



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL

**Der Anbau von  
Faserhanf (*Cannabis sativa* L.)  
als  
Winterzwischenfrucht**

Dissertation  
zur Erlangung eines Doktorgrades  
(Dr.-Ing.)

in der  
Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen  
der  
Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von  
**Susanne Richter**  
aus Göttingen

Wuppertal, 2018

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20190328-100815-6

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3A468-20190328-100815-6>]



*Folge nicht dem Pfad, sondern bahne Deinen eigenen Weg  
und hinterlasse eine Spur.*

(Ralph Waldo Emerson)





## Kurzfassung

Der Landwirtschaft stellt sich in Zukunft die Aufgabe den Nahrungsmittel- und Rohstoffbedarf der steigenden Weltbevölkerung zu decken. Der Anbau von Faserhanf (*Cannabis sativa* L.) als Winterzwischenfrucht bietet den Landwirten eine zusätzliche Wertschöpfung und steigert die Produktion des natürlichen Faserrohstoffs, der verstärkt in innovativen Werkstoffen eingesetzt wird.

Ziel der Arbeit ist es, das Pflanzenwachstum und die Nährstoffansprüche des Hanfes im Winteranbau zu untersuchen, um eine Anbauempfehlung für Landwirte herausarbeiten zu können. Dazu wurde der Hanf in zwei unterschiedlichen Saatstärken (25 kg/ha und 50 kg/ha) auf landwirtschaftlichen Flächen in Nordrhein-Westfalen und Mecklenburg-Vorpommern ausgesät. Der Anbau erfolgte auf zwei sandigen Böden (Braunerde-Regosol und Plaggenesch-Gley) mit Grundwasseranschluss und einem lehmigen Boden (Kolluvisol). Während des Anbaus wurden bodenkundliche Untersuchungen zur Bestimmung der physikalischen Parameter und der Nährstoffgehalte, sowie Pflanzenbonituren durchgeführt. Außerdem wurde die Faserqualität (Faserbreite, Zugfestigkeit, Zugmodul, Bruchdehnung) hinsichtlich ihrer Verwertbarkeit für industrielle Anwendungen analysiert. Zur Vergleichbarkeit wurden auf denselben Flächen im Folgejahr Hanf im Sommeranbau angebaut.

Im Winteranbau bildeten die Hanfpflanzen mittlere Höhen von 120 cm mit einem Stängeldurchmesser von 5 mm aus. Dabei konnten im Trend keine Unterschiede zwischen den beiden Aussaatstärken in Bezug auf den Ertrag ermittelt werden, so dass zur Kostenminimierung eine Saatstärke von 25 kg/ha empfohlen werden kann. Die verabreichende Düngemenge von 80 kg N/ha in Form von Wirtschaftsdüngern war für das Pflanzenwachstum ausreichend, da durch die verkürzte Wachstumszeit von maximal 60 Tagen weniger Biomasse entwickelt wird als im Sommeranbau. An den Versuchsstandorten wurde für die Wachstumszeit von Ende Juli bis Ende September eine Wärmesumme von 1100°C ermittelt. Aufgrund der regionalen Variabilität der Niederschläge wurden unterschiedliche Niederschlagssummen von 123 mm und 228 mm erfasst, von denen 28 mm und 75 mm in der Hauptwachstumszeit im August zur Verfügung standen. Die Pflanzen zeigten keinen Wassermangel, da die Wasserversorgung über den Grundwasseranschluss der Böden gewährleistet war.

Zusätzlich wurde ein Lysimeterexperiment durchgeführt, um die Sickerwassermengen und Nährstoffausträge unter der Hanfkultur zu bestimmen. Dabei wurden die gleichen Düngemengen wie im Feldversuch (80 kg N/ha zum Winteranbau und 120 kg N/ha zum Sommeranbau) appliziert. Die Ergebnisse wurden zusätzlich mit Daten von Schwarzbrache-Lysimetern und zwei Fruchtfolgen von Lysimetern des Teilprojektes „Integrierten Landbau“ verglichen. Es konnte nachgewiesen werden, dass im Hanfanbau signifikant weniger Sickerwasser gebildet wurde als unter Schwarzbrache. Die Sickerwassermengen und Nitrat-Kon-

zentrationen zwischen Hanfanbau (max. 23 mg NO<sub>3</sub>-N /l) und den Fruchtfolgen des Integrierten Landbaus (5-62 mg NO<sub>3</sub>-N/l) waren vergleichbar. Aus den Schwarzbrachen wurden mit bis zu 94 mg NO<sub>3</sub>-N/l signifikant höhere NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen bestimmt.

In der Weiterverarbeitung zu Formpressteilen für die Automobilindustrie erwiesen sich die im Winteranbau 2013/14 bestimmten Faserqualitäten besser geeignet als die im Sommer geernteten Hanffasern. Im Gegensatz zu den Fasern aus dem Sommeranbau konnten die frostgerösteten Fasern des Winteranbaus 2013/14 ohne die Zumischung von anderen Fasern (z.B. Flachs oder Kenaf) verwendet werden. Die Faserbreite und die Zugfestigkeit wurden durch die Röste über den Winter nicht beeinflusst. Dagegen wiesen die Fasern eine signifikante Reduzierung des Zugmoduls und Erhöhung der Bruchdehnung auf. Die Hektarerträge von ca. 25 dt lagen deutlich unter denen des Sommeranbaus (50-130 dt/ha), jedoch bietet diese Anbauform den Landwirten eine zusätzliche Wertschöpfung zum Hauptfruchtanbau und der Industrie eine höhere und kontinuierliche Verfügbarkeit des Rohstoffes.

Die Ergebnisse des Winteranbaus in dieser Arbeit sind vielversprechend und müssen durch mehrjährige Feldversuche auch auf weiteren Standorten verifiziert werden. Insbesondere muss der Selbstausdünnungseffekt über den Winter detaillierter untersucht werden. Mikroskopische Untersuchungen helfen, den Einfluss der Röste und des Frostes auf die Faserzellen zu charakterisieren. Ebenfalls ist weitere Forschung notwendig, um die Wachstumszeit der Pflanzen zu verlängern und den Ertrag zu erhöhen. Dazu könnten Versuche mit spätreiferen Sorten beitragen. Zur Optimierung des Anbaus ist jedoch die Züchtung von eigenständigen Sorten für den Winteranbau unabdingbar.

## Abstract

Agriculture faces a wide range of complex challenges that are likely to worsen in the future as the world's population continues to increase, including the growing demand for food as well as feed, fuel and industrial products. The cultivation of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) over winter increases the production and availability of a renewable raw material, which can be used in several innovative applications. Farmers will benefit through the planting of fibre hemp because it is an additional source of income and provides protection from soil erosion.

The aim of this thesis was to study the cultivation of fibre hemp through the winter season in a field trial. To achieve a best-practice recommendation, pedological (e.g., soil physical and chemical properties) and plant attendant (e.g., growth stage, dry matter, nutrient content) monitoring was executed. The hemp was sown at two different rates (25 kg/ha and 50 kg/ha). The trial was conducted at two sites in North Rhine-Westphalia with a sandy and loamy soil and one sandy soil in Mecklenburg-Western Pomerania. For purposes of comparison, there was hemp cultivated in summer season following the winter harvest. The obtained fibres were analyzed for quality (e.g., fibre width, elongation at break, tensile strength and tensile modulus) and processed into fibre fleeces and composites in an industrial process.

In the winter cultivation in 2013/14 the plants heights ranged between 100 and 130 cm with a medium stem diameter of 5 to 6 mm in spring before harvest. The harvests of 25 dt/ha, were substantially lower than those in summer, with 60 to 130 dt/ha.

There were no significant differences related to yields, so that the lower density with 25 kg/ha could be used to minimize seed costs. The applied fertilization of 80 kg nitrogen per hectare in the form of farm fertilizer (slurry and manure) was adequate partly because of the reduced growing time of maximum 60 days. For this period a heat summation (mean day temperature summed up over the growing period) of 1100°C was recorded. Precipitation ranged between 123 and 228 mm because of the high regional variability of rainfall. For August, the month with the most growth, 28,7 mm were collected on the sites in North Rhine-Westphalia and 75,2 mm in Mecklenburg-West Pomerania. There was no water stress for the plants because of a high ground water level on both sites.

Additionally a lysimeter experiment, based on non-weighing gravity-flow lysimeters, was carried out to analyze leaching under hemp cultivation with the same levels of applied fertilizer as in the field trial (80 kg N/ha in winter, 120 kg/ha in summer). In the lysimeter trial, a significantly lower leachate formation below hemp against unfertilized black fallow became apparent, which leads to a reduced risk of nitrate leaching and therefore a lower stress to ground water quality. The crop rotation of an integrated cultivation trial showed comparable amounts of percolated water. Nitrogen concentrations of leachates were highest under black fallow (up to 93,8 mg NO<sub>3</sub>-N per liter), under hemp cultivation maximum values of 22,8 mg NO<sub>3</sub>-N/l were measured. Concentration of phosphorous was always under 1 mg/l.

The field trial demonstrated that the fibre quality from the winter cultivation in 2013/14 was even better than the quality of fibres which were harvested in summer for reinforcement of composites for automotive purposes. The frost-retted fibres could be used without any additions of other materials (i.e. flax or kenaf) which is necessary for hemp fibres grown and retted in summer. The fibres of winter grown hemp were overretted because of the influence of frost and the long standing time until spring, which accounted for a decrease in fibre and fibre bundle width and an increase in fibre fineness and suitability for textile production. Although the tensile strength was not influenced, the tensile modulus was significantly reduced and the elongation at break was significantly increased by the impact of frost in winter season.

Further research should be carried out to optimize the winter cultivation of fibre hemp to help meet the industrial demand for fibre of high and homogeneous quality. To more thoroughly test the extent of growing time on fibre yields, trials with late flowering genotypes need to be conducted. If this form of cultivation becomes established, special breeding is needed. The self-thinning effect over the winter season has to be studied more intensively with ratings to determine suitable plant densities for high yields with low seed costs. Optical or scanning electron microscopy observations may help to characterize the influence of retting and frost to the fibre structure.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>i</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>iii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>viii</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>xi</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Zielsetzung .....</b>	<b>3</b>
<b>3 Stand der Forschung .....</b>	<b>5</b>
3.1 Faserpflanzen.....	5
3.2 Rechtsgrundlagen für den Anbau von Nutzhanf in Deutschland .....	5
3.3 Hanf im Winteranbau .....	6
3.4 Botanik .....	8
3.5 Klima- und Bodenansprüche .....	10
3.6 Aussaatstärke.....	11
3.7 Hauptnährstoffbedarf und Düngung.....	13
3.8 Ernte und Röste .....	15
3.9 Faserqualität .....	17
<b>4 Versuchsstandorte .....</b>	<b>19</b>
4.1 Landwirtschaftliche Versuchsflächen .....	19
4.1.1 Lage und Geologie .....	19
4.1.2 Klima.....	21
4.1.3 Bodenkundliche Standortaufnahme .....	22
4.2 Lysimeterstation Falkenberg .....	30
<b>5 Material und Methoden .....</b>	<b>33</b>
5.1 Bodenanalytik.....	33
5.2 Pflanzenbonituren und -analyse .....	35
5.2.1 Winteranbau 2013/14 .....	35
5.2.2 Sommeranbau 2014.....	36
5.3 Faseranalytik .....	37
5.4 Mikroskopie.....	37
5.4.1 Environmental Scanning Electron Microscopy (ESEM) .....	37
5.4.2 Durchlichtmikroskopie.....	38
5.5 Statistische Auswertung .....	38

<b>6</b>	<b>Ergebnisse Winteranbau 2013/14 .....</b>	<b>40</b>
6.1	Wetterdaten Winteranbau 2013/14 .....	40
6.2	Boden .....	46
6.2.1	Wassergehalte .....	46
6.2.2	Hauptnährstoffe im Boden .....	47
6.2.2.1	Nitrat-Stickstoff.....	48
6.2.2.2	Phosphor.....	49
6.2.2.3	Kalium.....	51
6.2.3	Heißwasserextrahierbarer Kohlenstoff und Stickstoff.....	52
6.3	Pflanzen.....	55
6.3.1	Pflanzenbonituren .....	55
6.3.2	Pflanzenanalyse.....	63
6.3.3	Faserqualität .....	67
6.3.4	Faserweiterverarbeitung.....	70
6.4	Zusammenfassung Winteranbau 2013/14.....	71
<b>7</b>	<b>Ergebnisse Sommeranbau 2014 .....</b>	<b>72</b>
7.1	Wetterdaten Sommeranbau 2014 .....	72
7.2	Boden .....	77
7.2.1	Wassergehalte .....	77
7.2.2	Hauptnährstoffe im Boden .....	77
7.2.2.1	Nitrat-Stickstoff.....	77
7.2.2.2	Phosphor.....	78
7.2.2.3	Kalium.....	79
7.2.3	Heißwasserextrahierbarer Kohlenstoff und Stickstoff.....	80
7.3	Pflanzen.....	82
7.3.1	Pflanzenbonituren .....	82
7.3.2	Pflanzenanalyse.....	84
7.3.3	Faserqualität .....	86
7.4	Zusammenfassung Sommeranbau 2014.....	87
<b>8</b>	<b>Vergleich Winter- und Sommeranbau .....</b>	<b>88</b>
<b>9</b>	<b>Lysimeterexperiment .....</b>	<b>89</b>
9.1	Wetterdaten .....	89
9.2	Pflanzenbonituren .....	92
9.3	Sickerwasser.....	98
9.3.1	Sickerwassermengen.....	98
9.3.2	Nährstoffkonzentrationen.....	101
9.3.3	Nährstoffgehalte.....	104

---

<b>10 Einfrierversuch</b>	<b>107</b>
<b>11 Mikroskopische Aufnahmen</b>	<b>110</b>
<b>12 Diskussion</b>	<b>113</b>
12.1 Hypothese I: Standort	113
12.1.1 Klima	113
12.1.2 Boden	115
12.1.3 Nährstoffe	119
12.1.3.1 Düngung	119
12.1.3.2 Nitrat-Stickstoff	120
12.1.3.3 Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphors ( $P_{DL}$ ) und Kaliums ( $K_{DL}$ )	124
12.1.3.4 Phosphor	125
12.1.3.5 Kalium	126
12.2 Hypothese II: Aussaatstärke	128
12.3 Hypothese III: Sickerwassermenge und Nährstoffaustrag	132
12.3.1 Sickerwassermenge	132
12.3.2 Nährstoffaustrag	133
12.3.2.1 Nitrat-Stickstoff	133
12.3.2.2 Phosphor	136
12.3.2.3 Kalium	139
12.4 Hypothese IV: Frosteinwirkung auf die Faserqualität	140
<b>13 Fazit</b>	<b>145</b>
<b>14 Forschungsbedarf und Ausblick</b>	<b>148</b>
<b>15 Literaturverzeichnis</b>	<b>151</b>
<b>Anhang</b>	<b>180</b>
<b>Danksagung</b>	<b>229</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Gliederung der Arbeit.....	4
Abb. 3-1: Vereinfachter Querschnitt eines Hanfstängels .....	9
Abb. 3-2: Querschnitt eines Faserbündels .....	16
Abb. 4-1: Lage der Versuchsstandorte nach geologischer Einheit.....	20
Abb. 4-2: Bodenprofil am Standort Lärz .....	23
Abb. 4-3: Bodenprofil am Standort Vermold 1 .....	25
Abb. 4-4: Bodenprofil am Standort Vermold 2 .....	27
Abb. 4-5: Aufbau der Lysimeter in Falkenberg.....	31
Abb. 5-1: Beprobungsschema der Bohrstockkartierung.....	33
Abb. 5-2: Box-Whisker-Plot, vereinfachte Darstellung (a) und Darstellung mit Whiskern und Ausreißern (b).....	39
Abb. 6-1: Wetterdaten des Standortes Lärz, Winteranbau 2013/14 .....	40
Abb. 6-2: Wetterdaten des Standortes Vermold, Winteranbau 2013/14.....	41
Abb. 6-3: Vergleich langjähriges Mittel zu den aktuellen Temperatur- und Nieder- schlagsverläufen der Standorte Lärz (a) und Vermold (b) .....	42
Abb. 6-4: Wasserverfügbarkeit nach Heyland (1991), Winteranbau 2013/14 .....	44
Abb. 6-5: Niederschlagssummenkurven der Versuchsstandorte Lärz und Vermold, Winteranbau 2013/14 .....	45
Abb. 6-6: Volumetrische Wassergehalte im Boden der Versuchsstandorte, Winteranbau 2013/14 .....	46
Abb. 6-7: Nitratstickstoffgehalte in den Aussaatstärken 25 kg/ha (a) und 50 kg/ha (b), Winteranbau 2013/14 .....	48
Abb. 6-8: Phosphorgehalte der Bodentiefe 0-30 cm in den Aussaatstärken 25 kg/ha (a) und 50 kg/ha (b), Winteranbau 2013/14.....	50
Abb. 6-9: Kaliumgehalte der Bodentiefe 0-30 cm in den Aussaatstärken 25 kg/ha (a) und 50 kg/ha (b), Winteranbau 2013/14.....	51
Abb. 6-10: Heißwasserextrahierbarer Kohlenstoff in den Aussaatstärken 25 kg/ha (a) und 50 kg/ha (b), Winteranbau 2013/14.....	53
Abb. 6-11: Heißwasserextrahierbarer Stickstoff und Gesamtstickstoff in den Aussaatstärken 25 kg/ha (a) und 50 kg/ha (b), Winteranbau 2013/14 .....	54



Abb. 6-12: Verlauf des Pflanzenwachstums bis zur Blüte, Winteranbau 2013/14.....	56
Abb. 6-13: Box-Whisker-Plot der Stängeldurchmesser zum Ende der Blüte, Winteranbau 2013/14.....	58
Abb. 6-14: Korrelation Stängeldurchmesser zur Pflanzenhöhe zum Blühende, Winteranbau 2013/14 .....	59
Abb. 6-15: Box-Whisker-Plot der Wurzellängen zum Ende der Blüte, Winteranbau 2013/14 .....	59
Abb. 6-16: Wurzeldeformation am Standort Vermold 1, Winteranbau 2013/14.....	60
Abb. 6-17: Box-Whisker Plot der Pflanzenanzahl pro Quadratmeter zur Ernte, Winteranbau 2013/14.....	61
Abb. 6-18: Box-Whisker-Plot der errechneten Hektarerträge aus den Quadratmeterernten, Winteranbau 2013/14.....	62
Abb. 6-19: Prozentuale Anteile der Pflanzenorgane am Gesamtgewicht zur Beprobung am Ende der Blüte, Winteranbau 2013/14.....	63
Abb. 6-20: Box-Whisker-Plot der Faserbreite, Winteranbau 2013/14 .....	68
Abb. 6-21: Box-Whisker-Plot der Zugfestigkeit, Winteranbau 2013/14.....	69
Abb. 6-22: Box-Whisker-Plot des Zugmoduls, Winteranbau 2013/14.....	69
Abb. 6-23: Box-Whisker-Plot der Bruchdehnung, Winteranbau 2013/14.....	70
Abb. 7-1: Wetterdaten Lärz, Sommeranbau 2014 .....	72
Abb. 7-2: Wetterdaten Vermold, Sommeranbau 2014.....	73
Abb. 7-3: Vergleich langjähriges Mittel zu Wetterdaten des Sommeranbaus 2014, Standorte Lärz (a) und Vermold (b).....	74
Abb. 7-4: Wasserverfügbarkeit nach Heyland für die Standorte Lärz (a) und Vermold (b), Sommeranbau 2014.....	75
Abb. 7-5: Niederschlagssummenkurven der Versuchsstandorte, Sommeranbau 2014 ....	76
Abb. 7-6: Volumetrische Wassergehalte der verschiedenen Bodentiefen zur Aussaat und zur Ernte, Sommeranbau 2014 .....	77
Abb. 7-7: Nitrat-Stickstoffgehalte im Boden, Sommeranbau 2014.....	78
Abb. 7-8: Phosphorgehalte der Bodentiefe 0-30 cm, Sommeranbau 2014.....	79
Abb. 7-9: Kaliumgehalte der Bodentiefe 0-30 cm, Sommeranbau 2014.....	80
Abb. 7-10: Heißwasserextrahierbarer Kohlenstoff im Boden, Sommeranbau 2014 .....	80
Abb. 7-11: Heißwasserextrahierbarer Stickstoff im Boden, Sommeranbau 2014.....	81

Abb. 7-12: Verhältnis von Pflanzenhöhen zu Stängeldurchmesser, Sommeranbau 2014 .	83
Abb. 7-13: Box-Whisker-Plot der Hektarerträge, Sommeranbau 2014 .....	83
Abb. 7-14: Prozentualer Anteil der Pflanzenanteile am Gesamtpflanzengewicht, Sommeranbau 2014 .....	84
Abb. 9-1: Wetterdaten der Lysimeterstation Falkenberg, Winteranbau 2013/14.....	89
Abb. 9-2: Wetterdaten der Lysimeterstation Falkenberg, Sommeranbau 2014 .....	90
Abb. 9-3: Wetterdaten der Lysimeterstation Falkenberg, Winteranbau 2014/15.....	91
Abb. 9-4: Pflanzenhöhen Winteranbau 2013/14 Lysimeter, ungedüngte Lysimeter (a) und mit 80 kg N/ha gedüngte Lysimeter (b) .....	92
Abb. 9-5: Box-Whisker-Plot der Pflanzenhöhe (a) und des Stängeldurchmessers (b) zur der Ernte .....	93
Abb. 9-6: Pflanzenhöhen der mit 80 kg N/ha (a) und 120 kg N/ha (b) gedüngten Lysimeter, Sommeranbau 2014.....	94
Abb. 9-7: Box-Whisker-Plot der Pflanzenhöhe (a) und des Stängeldurchmessers (b) der unterschiedlich gedüngten Lysimeter, Sommeranbau 2014.....	95
Abb. 9-8: Anteil der Pflanzenorgane am Gesamtpflanzengewicht auf den unterschiedlich gedüngten Lysimetern, Sommeranbau 2014 .....	96
Abb. 9-9: Niederschlag und Abfluss der mit Hanf bestellten Lysimeter im Vergleich zum Abfluss der Schwarzbrache-Lysimeter .....	99
Abb. 9-10: Nährstoffkonzentrationen und Sickerwassermengen der Lysimeter.....	103
Abb. 9-11: Sickerwassermengen und Nährstoffausträge der verschiedenen Lysimeter ..	105
Abb. 10-1: Box-Whisker-Plot der Faserbreite, Einfrierversuch .....	107
Abb. 10-2: Box-Whisker-Plot der Bruchdehnung, Einfrierversuch .....	108
Abb. 10-3: Box-Whisker-Plot der Zugfestigkeit, Einfrierversuch .....	108
Abb. 10-4: Box-Whisker-Plot des Zugmoduls, Einfrierversuch .....	109
Abb. 11-1: Aufnahme mittels ESEM durch einen Hanfstängel .....	110
Abb. 11-2: Fluoreszenz-Lichtmikroskopie, Querschnitt durch einen ungerösteten Hanfstängel.....	111
Abb. 11-3: Dunkelfeld-Mikroskopie von Faserzellen .....	111
Abb. 11-4: Fluoreszenz-Lichtmikroskopie, Querschnitt durch einen gerösteten Hanfstängel .....	112
Abb. 13-1: Anbauempfehlung für Hanf über den Winter.....	147

## Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1: Morphologisch und mechanische Eigenschaften von Faserhanf.....	18
Tab. 4-1: Bodenkennwerte der Versuchsflächen .....	29
Tab. 4-2: Bodenkennwerte der verwendeten Lysimeter .....	30
Tab. 4-3: Ausgebrachte Düngemengen auf den mit Hanf bestellten Lysimetern .....	32
Tab. 5-1: Beprobungstermine im Winteranbau 2013/14.....	34
Tab. 5-2: Beprobungstermine im Sommeranbau 2014 .....	34
Tab. 5-3: Untersuchungsparameter und Messmethoden der Bodenproben .....	35
Tab. 5-4: Untersuchungsparameter und Messmethoden der Pflanzenproben.....	36
Tab. 6-1: Aussaatstärke und Pflanzenzahlen pro Quadratmeter nach dem Auflaufen, Winteranbau 2013/14.....	56
Tab. 6-2: Pflanzenhöhen zum Ende der Blüte, Winteranbau 2013/14.....	57
Tab. 6-3: Ausdünnungsrate vom Pflanzenauflauf bis zur Ernte, Winteranbau 2013/14..	60
Tab. 6-4: Hauptnährstoffgehalte der verschiedenen Pflanzenorgane zum Blühende, Winteranbau 2013/14.....	64
Tab. 6-5: Nährstoffentzug pro Tonne Hanfstrohertrag und Hektar, Winteranbau 2013/14 .....	65
Tab. 6-6: Mittlere, minimale und maximale Nährstoffentzüge durch die Pflanzen, berechnet über die Hektarerträge, Winteranbau 2013/14.....	66
Tab. 6-7: Nährstoffbilanzen zum Wachstumsende, Winteranbau 2013/14.....	67
Tab. 6-8: Fasermasseanteil an der Gesamtpflanzenmasse, Winteranbau 2013/14.....	68
Tab. 7-1: Pflanzenbonituren, Sommeranbau 2014.....	82
Tab. 7-2: Nährstoffgehalte in den verschiedenen Pflanzenteilen, Sommeranbau 2014...	85
Tab. 7-3: Nährstoffentzüge durch den Hanfanbau, berechnet anhand der bestimmten Erntemengen, Sommeranbau 2014.....	85
Tab. 7-4: Nährstoffbilanzen im Boden von der Aussaat bis zur Ernte, Sommeranbau 2014 .....	86
Tab. 7-5: Parameter der Faserqualität, Sommeranbau 2014 .....	86
Tab. 8-1: Vergleich der Faserqualitäten, Winteranbau 2013/14 und Sommeranbau 2014 .....	88

Tab. 9-1: Erntemengen und Nährstoffentzüge durch die Pflanzen auf den Lysimetern, Sommeranbau 2014 .....	97
Tab. 9-2: Pflanzenbonituren von den Lysimetern, Winteranbau 2014/15 .....	97
Tab. 9-3: Sickerwassermengen und Nährstoffausträge der Lysimeter über den gesamten Versuchszeitraum .....	106

## Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AG	Arbeitsgruppe
Al	Aluminium
BGL	Bodengroßlandschaften
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BtMG	Betäubungsmittelgesetz
BÜK	Bodenübersichtskarte
°C	Grad Celsius
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
CAL	Calcium-Acetat-Lactat
CFA	Continuous-Flow Analysis
C <sub>HWE</sub>	heißwasserextrahierbarer Kohlenstoff
C <sub>org</sub>	Organischer Kohlenstoff
cm	Zentimeter
cm <sup>3</sup>	Kubikzentimeter
d	Tag
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DL	Doppellactat
dt	Dezitonne
DüMV	Düngemittelverordnung
DüV	Düngeverordnung
DWD	Deutscher Wetterdienst
EPA	United States Environmental Protection Agency
EN	Europäische Norm
ESEM	Environmental scanning electron microscope

<i>et al.</i>	und andere
EU	Europäische Union
Fe	Eisen
g	Gramm
GK	Gehaltsklasse
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
KA	Kartieranleitung
ha	Hektar
HTK	Hühnertrockenkot
ICP-OES	optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (engl.: inductively coupled plasma-optical emission spectrometry)
IQR	Interquartilabstand (interquartile range)
InVekos	Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem
ISO	International Organization for Standardization
K	Kalium
KAK	Kationen-Austausch-Kapazität
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Kaliumsulfat
KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage
K <sub>DL</sub>	Doppellactat-lösliches Kalium
kg	Kilogramm
km	Kilometer
l	Liter
L	Standort Lärz
L, 25 bzw. L, 50	Standort Lärz, Aussaatstärke 25 kg/ha bzw. 50 kg/ha
L.	botanisches Autorenkürzel von Carl von Linné
LUFA	Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt
LWK	Landwirtschaftskammer
Lys.	Lysimeter

---

M	Mittelwert
m	Meter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
max	Maximal
Mdn	Median
Mg	Magnesium
mg	Milligramm
Mio	Millionen
Min	Minimal
mm	Millimeter
MPa	Megapascal
n	Anzahl
n.b.	nicht bestimmt
N	Stickstoff
nFK	nutzbare Feldkapazität
NHN	Normalhöhennull
NH <sub>4</sub> -N	Ammoniumstickstoff
N <sub>HWE</sub>	heißwasserextrahierbarer Stickstoff
N <sub>min</sub>	mineralisierbarer Stickstoff
NO <sub>3</sub> -N	Nitrat-Stickstoff
NPK	Stickstoff, Phosphor, Kalium (als Hauptnährstoffe)
Nr.	Nummer
NRW	Nordrhein-Westfalen
N <sub>t</sub>	Gesamt-Stickstoff
o.J.	ohne Jahresangabe
o.V.	ohne Verfasser
P	Phosphor
P <sub>DL</sub>	Doppellactat-löslicher Phosphor
P <sub>ges</sub>	Gesamt-Phosphor
p	Signifikanzniveau

P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Phosphat
Pfl.	Pflanzen
PN	Probennahme
ρ <sub>t</sub>	Trockenrohdichte
rel.	relative
R <sup>2</sup>	Regressionskoeffizient
S	Seite
SD	Standardabweichung (standard deviation)
SH	Hanf im Sommeranbau
THC	Tetrahydrocannabinol
TKG	Tausendkorngewicht
TM	Trockenmasse
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
V	Standort Vermold
V1, 25 bzw. V1, 50	Standort Vermold 1, Aussaatstärke 25 kg/ha bzw. 50 kg/ha
V2, 25 bzw. V2, 50	Standort Vermold 2, Aussaatstärke 25 kg/ha bzw. 50 kg/ha
VDLUFA	Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
Vol.	Volumen, volumetrisch
Wdh.	Wiederholung
W.	Woche
WH	Hanf im Winteranbau
μm	Mikrometer



# 1 Einleitung

Hanf gehört weltweit zu einer der ältesten Nutzpflanzen und ist eine der bedeutendsten Faserpflanzen (Mielcke & Butin 2002, Schluttenhofer & Yuan 2017, Papastylianou *et al.* 2018). Vom ersten Jahrtausend bis in die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts hinein, war Hanf die am häufigsten angebaute Feldfrucht auf der Erde (Cherney & Small, 2016). Daraus wurden Fasern, Tuche, Leuchtöle, Papier und Arzneimittel hergestellt (Anhang 1) (Herer 1993), zudem stellten die Samen ein wichtiges Nahrungsmittel dar (Zhou *et al.* 2018). Der Import von günstigeren Fasern, wie z.B. Baumwolle oder Jute, verdrängte den Hanf im 19. Jahrhundert vielfach aus technischen Anwendungen. Die Marihuana-Prohibition der USA führte ab den 1940 Jahren in vielen Ländern der Welt zu Anbauverböten, die den Hanfanbau, unabhängig davon, ob es sich um Faser- oder Drogenhanf handelte, fast zum Erliegen brachte (Karus *et al.* 2008, Salentijn *et al.* 2015). Nach Aufhebung des Anbauverböts in den 1990er Jahren stieg die Anbaufläche wieder an. Neben einer textilen Verwertung von hochwertigen Fasern (Rijavic *et al.* 2017), besteht heute ein großes Interesse an Naturfasern, die als nachwachsender Rohstoff eine Alternative zu etablierten Faserverbundstoffen, wie Glas- oder Karbonfasern darstellen (Scheer-Triebel & Léon 2000, Snegireva *et al.* 2015, Del Rey *et al.* 2017) und wesentlich umweltschonender als Kunststoffe auf Erdölbasis sind (Dayo *et al.* 2018, Väisänen *et al.* 2018). In Kombination mit modernen Baustoffen werden sie für innovative Produkte mit vielseitiger Verwendung eingesetzt, wie z.B. Innenausstattung von Fahrzeugen, Möbel und Haushaltswaren (Kisten, Blumentöpfe, Spielzeug usw.) (Bismarck *et al.* 2002, Chernova *et al.* 2018, Wang *et al.* 2018). Ein weiterer großer Industriezweig, der Hanf als Rohstoff wiederentdeckt hat, ist die Papierindustrie. Als schnell nachwachsender Rohstoff bieten Hanffasern eine Alternative zu Holzfasern, die zur Herstellung von Zellstoffen für die Papierindustrie eingesetzt werden (Danielewicz & Surma-Ślusarska 2018).

Der Anbau von Faserhanf findet traditionell als Hauptfrucht im Sommeranbau statt, da Hanf keine frostharte Feldfrucht ist. Die Aussaat erfolgt von Mitte März bis Anfang Mai und die Ernte wird mit folgender Röste im Spätsommer durchgeführt. Da es im Spätsommer für die Landwirte stets zu Arbeitsspitzen kommt und anhaltende Niederschläge eine ausreichende Trocknung und somit Feldröste erschweren, kam es aufgrund von Schimmelbildung im feuchten Erntegut zu minderwertigen Qualitäten (Pasila 2000). Daher wurde in Skandinavien die „Dry-line-Methode“ getestet, bei der die Pflanzen im Frühjahr ausgesät werden, eine Samen-ernte im Herbst erfolgt und das Stroh im Folgefrühjahr, welches die niederschlagärmste Zeit im Jahr darstellt, geerntet wird (Kymäläinen *et al.* 2001). Die Aufbereitung wird durch die Frosteinwirkung im Winter vereinfacht, da sich die Faserzellen durch die Ausdehnung des gefrierenden Wassers die Faserzellen besser vom Holzteil lösen. Auch in Polen und Tschechien soll bereits bei ungünstigen Wetterlagen auf die Ernte im Frühjahr ausgewichen werden (mündliche Mitteilung). Neben den Problemen, die bei der Röste auftreten, kommt in Deutschland noch die mangelnde Konkurrenzfähigkeit der Hanffaser gegenüber anderen

Marktfrüchten, wie z.B. Winterweizen, Raps, Mais usw. hinzu, die den Hanfanbau nicht lukrativ machen (Papastylianou *et al.* 2018). Daher kam die Idee auf, den Hanf nicht als Hauptfrucht, sondern als „Winterzwischenfrucht“ anzubauen, um den Landwirten eine zusätzliche Wertschöpfung zu ermöglichen. Wichtig ist dabei eine frühräumende Vorfrucht (z.B. Gerste, Wickroggen), die eine frühe Aussaat des Hanfes von Mitte bis Ende Juli ermöglicht. Durch die Bestellung des Feldes über den Winter kommen neben den finanziellen Gewinn, noch viele ökologische Vorteile hinzu (Auflockerung der Fruchtfolge, Schutz vor Bodenerosion, Unkrautunterdrückung, Deckung für Wildtiere).

Der Anbau von Faserhanf ist bei der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung meldepflichtig. Bis zum 01.07. eines Anbaujahres musste die Anbauanzeige dort eingegangen sein. Für die nachstehende Arbeit wurde über die Universität Wuppertal eine Ausnahmeregelung für Forschungszwecke für die Landwirte dieses Projektes erwirkt. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse und der Eigeninitiative des Verarbeiters und eines beteiligten Landwirtes, wurde mit einer Gültigkeit ab dem 10.03.2017 der Paragraph 24a des Betäubungsmittelgesetzes (BtMG) geändert, wodurch allen Landwirten ein Anbau von Faserhanf nun auch nach dem 01.07. des Anbaujahres möglich ist. (BMEL 2017).

Die präsentierten Ergebnisse basieren auf der Datengrundlage des Projektes „Hanf als Winterzwischenfrucht“, gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Förderkennzeichen 22015811). Ein Abschlussbericht des Gesamtprojektes liegt dem Projektträger (Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V.) vor, der bislang nicht veröffentlicht ist.

## 2 Zielsetzung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde Faserhanf in einem Praxisversuch von zwei landwirtschaftlichen Betrieben über den Winter 2013/14 angebaut. Neben der Umsetzung des Anbaus in die Fruchtfolgerotation der Landwirte, wurden die Wetter-, Boden- und Nährstoffansprüche der Hanfpflanzen herausgearbeitet, sowie die Faserqualität (Faserbreite, Zugfestigkeit, Zugmodul und Bruchdehnung) bestimmt. Ein Lysimeterexperiment wurde zur Bestimmung des Sickerwasser- und Nährstoffaustrages unter Hanfanbau durchgeführt. Der Einfluss des Frostes auf die Parameter der Faserqualität wurde mit einem Einfrierversuch näher untersucht.

Auf den Flächen der kooperierenden Landwirte wurde anschließend an den Winteranbau 2013/14 Hanf über den Sommer angebaut, um das Ertragspotenzial der ausgewählten Böden mit Literaturangaben vergleichen zu können.

Anhand der folgenden Arbeitshypothesen wurden der Einfluss von Standort und Umweltbedingungen, Aussaatstärke, Sickerwassermenge und Nährstoffaustrag, sowie die Frosteinwirkung auf die Faserqualität bearbeitet:

### I. Standort (Klima, Boden und Nährstoffe)

Der Standort hat einen großen Einfluss auf das Wachstum und die Entwicklung der Hanfpflanzen bzw. deren Faserqualität. Die standortbedingte Variabilität der Witterungsbedingungen ist durch den Landwirt nicht steuerbar und ist meist bedeutender als Saatstärke oder Düngungseffekte.

**Hypothese I:** Die Ansprüche der Hanfpflanzen an den Standort sind aufgrund der verkürzten Wachstumszeit im Winteranbau geringer als im Sommeranbau.

### II. Aussaatstärke

Die Aussaatstärke stellt im Hanfanbau eine wichtige Steuergröße bezüglich der Bestandsstruktur und der Pflanzenentwicklung dar. In Beständen mit hohen Aussaatstärken sterben aufgrund des Selbstausdünnungseffektes vermehrt Pflanzen durch die hohe innerartliche Konkurrenz um Nährstoffe, Wasser, Licht und Raum ab. In Beständen mit zu geringer Aussaatstärke bilden sich weniger Pflanzen mit starken Stängeldurchmessern aus, die eine Weiterverarbeitung erschweren bzw. die Faserqualität mindern können.

**Hypothese II:** Für den Winteranbau gelten dieselben Saatstärkenempfehlungen wie für den Sommeranbau.

### III. Sickerwasser- und Nährstoffaustrag

Die Düngung, insbesondere mit Stickstoff, wirkt sich direkt auf das Pflanzenwachstum aus. Ein Austrag mit dem Sickerwasser stellt dem gegenüber eine Belastung des Grundwassers dar. In einem Lysimeterexperiment wurde das Sickerwasser unter Hanfanbau aufgefangen und auf die Hauptnährstoffe (NPK) analysiert.

**Hypothese III:** Der Anbau von Hanf über den Winter reduziert bzw. verringert die Gefahr des Nährstoffaustrags in das Grundwasser.

#### IV. Frosteinwirkung auf die Faserqualität

Neben dem Vergleich der Faserqualität aus dem Winteranbau gegenüber dem Sommeranbau, stellt sich generell die Frage, inwieweit die Faserqualität durch den Frost beeinflusst wird. Versuche aus Skandinavien belegen, dass sich durch die Frosteinwirkung die Fasern einfacher bei der Aufbereitung vom Holzteil lösen lassen.

**Hypothese IV:** Die Einwirkung des Frostes erleichtert die mechanische Aufbereitung und beeinflusst die Qualitätsparameter (Faserbreite, Bruchdehnung, Zugfestigkeit und Zugmodul) positiv.

Neben der Bearbeitung der Arbeitshypothesen, soll die Auswertung der Ergebnisse eine Anbauempfehlung für den Hanf im Winteranbau ermöglichen, die eine ganzjährige Bereitstellung an hochwertigen Fasern gewährleistet.

Der Inhalt dieser Arbeit gliedert sich demnach wie folgt:

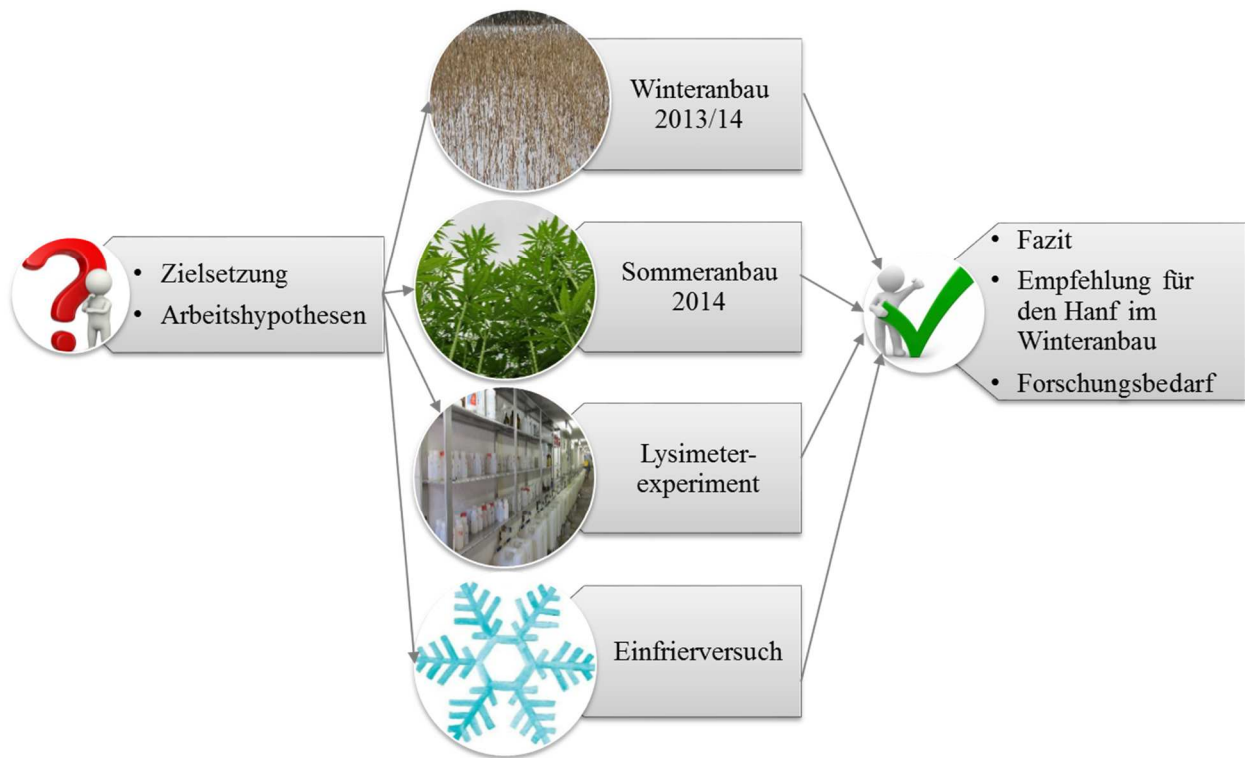


Abbildung 2-1: Gliederung der Arbeit

## 3 Stand der Forschung

### 3.1 Faserpflanzen

Die Nutzung alter Kulturpflanzen als nachwachsende Rohstoffe ist seit Mitte der 1990er Jahre aufgrund einer verstärkten Nachfrage an Rohstoffen und im Kontext des Klimawandels und Umweltschutzes wieder verstärkt ins Blickfeld gerückt (Fernea *et al.* 2017). Pflanzliche Naturfasern werden in Samenfasern (z.B. Baumwolle, Kapok), Blatt- oder Hartfasern (z.B. Sisal, Manila, Kokos) und Bast- oder Stängelfasern (z.B. Lein, Hanf, Jute, Ramie) unterschieden (Haverkamp 2014), deren Hauptbestandteil Zellulose ist. Die Pflanzenfasern bestehen entweder aus einer Pflanzenzelle (z.B. bei Holz und Baumwolle) oder aus mehreren Zellen, die durch nicht-zellulose Stoffe zusammen gehalten werden (z.B. Jute, Hanf, Flachs, Kenaf) (Tahir *et al.* 2011). Als einheimische Faserpflanzen kommen in Deutschland Faserhanf (*Cannabis sativa* L.), Faser- und Industrielein (*Linum usitatissimum* L.) sowie Nessel (*Urtica dioica* L.) für die Erzeugung innovativer Faserprodukte in Betracht (Ordon & Friedt 2000, Scheer-Triebel & Léon 2000, Stroh-Lömpcke 2006), wobei beim Faserhanfanbau mit bis zu 180 Dezitonnen pro Hektar deutlich höhere Fasererträge erwartet werden (Scheer-Triebel & Léon 2000, Graf *et al.* 2005b). Die gezielte Substitution von synthetischen Fasern könnte der Landwirtschaft ökonomische als auch ökologische Vorteile bieten (von Francken-Welz & Léon 2003). Die Anwendungsgebiete von Industriehanf sind dabei weit gefächert, neben der Nutzung der Fasern für Textilien, Formpressteile und Baumaterialien usw., können von der Pflanze auch die Blätter, Schäben, Blüten und Samen verwendet werden (Anhang 1).

Das fehlende wissenschaftliche und agronomische Know-how für eine Produktion von Naturfasern mit gleichbleibender Qualität, sowie nicht definierte Qualitätskriterien seitens der Industrie verzögert die Erschließung von neuen Absatzmärkten für Naturfasern (Scheer-Triebel & Léon 2000). Faserpflanzen wie Hanf und Flachs erweitern die Agrobiodiversität und wirken sich positiv auf die Folgefrucht aus. Allerdings haben die Pflanzen aufgrund der verhaltenen Entwicklung der Anbauflächen züchterisch aktuell an Bedeutung verloren. Auf die Hanfzüchtung, sowie den Anbau, wirkt sich zusätzlich das Betäubungsmittelgesetz hemmend aus, wonach nur EU-zertifizierte Sorten mit einem Gehalt an Tetrahydrocannabinol (THC) unter 0,2 % für den Anbau zugelassen werden (BLE 2017).

### 3.2 Rechtsgrundlagen für den Anbau von Nutzhanf in Deutschland

Durch die globale Drogen- und Handelspolitik wurde der Hanfanbau im 20. Jahrhundert stark eingeschränkt, obwohl Faserhanfsorten nur einen sehr geringen THC-Gehalt aufweisen. Mit der Änderung des Betäubungsmittelgesetzes 1982, wurde der Hanfanbau in Deutschland gänzlich verboten. Dadurch gingen Erfahrungen für Anbau, Ernte und Verarbeitung verloren, Industriestrukturen wurden abgebaut. Auch im pflanzenzüchterischen Bereich gab es keine

Weiterentwicklung (Haverkamp 2014). Nach Schäfer (2003) sind in Frankreich und Osteuropa die Züchtung und Aufbereitungsmethoden fortschrittlicher und weiter verbreitet als in Deutschland, da es in diesen Ländern kein Anbauverbot von Hanf gab.

Erst 1996 wurde der Anbau von THC-armen Nutzhansorten durch die Europäische Union (EU) zur Faser- und Samenproduktion in Deutschland wieder zugelassen (Rijavec *et al.* 2017). Allerdings wird die Etablierung der alten Kulturpflanze durch die strenge Regulierung des Nutzhanfbaus in Deutschland nicht unbedingt erleichtert. Der Anbau ist genehmigungspflichtig und es dürfen nur EU-zertifizierte Sorten eingesetzt werden, deren Katalog für jedes Anbaujahr neu herausgegeben wird (BLE 2017). Für die rechtskonforme Durchführung des Hanfanbaus in Deutschland, einschließlich der THC-Kontrollen ist die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) zuständig (Haverkamp 2014). Bis zum 01. Juli des Anbaujahres muss das Formular „Anzeige des Anbaus von Nutzhanf gemäß § 24a BtMG“ in dreifacher Ausfertigung bei der BLE eingereicht werden. Des Weiteren muss der Beginn der Blüte gemäß § 25 Absatz 2 der Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem (InVeKos)-Verordnung der BLE gemeldet werden. Mit der Ernte darf erst begonnen werden, wenn der Landwirt von der BLE ein Freigabeschreiben erhält oder eine Kontrolle der Blüten auf deren THC-Gehalt stattgefunden hat.

Für den Verkauf der Hanffasern sollte mit einem Hanf verarbeitenden Unternehmen ein Abnahmevertrag geschlossen werden (Roller 2009). Da das Hanfstroh dorthin transportiert werden muss, müssen Transportaufwand und -kosten zur Verarbeitungsanlage einkalkuliert werden. Das Volumen von Hanfstroh ist dabei mit dem von Getreidestroh zu vergleichen (Graf *et al.* 2005a).

### **3.3 Hanf im Winteranbau**

Bereits Anfang des 20. Jahrhunderts wurde Hanf als Zweitfrucht nach Futtergetreide angebaut (Roller 2009). Die Aussaat lag Mitte Juni und die Ernte wurde im Spätsommer/Herbst durchgeführt. Jedoch wurde diese Anbauform aufgrund ertragsschwächeren Beständen als im „konventionellen“ Hauptfruchtanbau (Scheel 1937) nicht weiter praktiziert. Als Hauptfrucht steht der Faserhanf in Konkurrenz zu anderen leistungsstarken Feldfrüchten, wie Winterweizen, Raps, Mais usw., die auf dem Markt mehr Gewinn erwirtschaften (Zöphel *et al.* 2001b).

In Skandinavien wird seit 1996 die „Dry-line Methode“ praktiziert und. Dabei wird der Hanf konventionell im April ausgesät, die Fasern werden jedoch erst, nach Trocknung über den Winter, im folgenden Frühjahr geerntet. Zu feuchte Wetterbedingungen im Herbst erschweren die Ernte und Röste. Daraus entstand die Idee, die Pflanzen im Winter den Frost ausgesetzt zu lassen und das Frühjahr für die Trocknung zu nutzen (Kymäläinen & Pasila 2000, Pasila 2000, Kymäläinen *et al.* 2001, Pasila 2004).

Der Anbau von Faserhanf über den Winter, mit einer späten Aussaat im Juli und anschließender Froströste, stellt ein absolutes Novum dar, wozu aktuell noch keine Forschungsergebnisse und Publikationen vorliegen. Aufgrund der Anbauregulierung und des jahre-

langen generellen Anbauverbotes von Hanf, trat der Hanf erst Ende der 1990er Jahre wieder in den Fokus der Forschung. Forschungsergebnisse werden zwar publiziert, jedoch erscheinen Forschungsberichte oftmals nur in der Landessprache (vor allem im skandinavischen und osteuropäischen Raum) oder in Institutsreihen, die der Allgemeinheit nicht zugänglich sind. Viele Erfahrungswerte im Hanfanbau werden durch Landwirte gesammelt und bleiben größtenteils undokumentiert. Zum einen fehlen Vorgaben für das Erzielen einer guten Faserqualität sowie Anforderungen und Angaben seitens der verarbeitenden Industrie. Agronomische Versuche wurden vor allem zur Stickstoffdüngung und Aussaatstärke durchgeführt (Amaducci *et al.* 2008a, Van der Werf *et al.* 1995a, Van der Werf *et al.* 1995b, Van der Werf *et al.* 1995c, Léon *et al.* 2004, Graf *et al.* 2005a, Haverkamp 2014).

Nach Aufhebung des Anbauverbotes 1996, war der Anbau von Faserhanf bis 2017 nur mit einer Aussaat bis zum 01. Juli, aufgrund der gesetzlichen Verordnungen, möglich. Mit einer Sondergenehmigung für die Universität konnte der Anbau von Faserhanf über den Winter zu wissenschaftlichen Zwecken (Bearbeitung eines Forschungsprojektes und Erstellung dieser Promotionsarbeit) durchgeführt werden. Da die Ergebnisse der ersten Anbaujahre vielversprechend waren, wurde, durch die Bemühungen und den Einsatz eines Faserverarbeiters und eines beteiligten Landwirtes, dem § 28 der InVeKoS-Verordnung durch den Bundesrat der Absatz 4 hinzugefügt. Demnach ist es den Landwirten seit 2017, durch die Verordnung der Bundesanstalt für Ernährung und Landwirtschaft (BLE) erlaubt, Hanf auch nach dem 01. Juli des Anbaujahres anzubauen. Eine Klassifizierung dieser neuen Anbauform in die vorhandenen Strukturen ist nicht ganz eindeutig. Auch wenn die Aussaat des Hanfes bis zum 01. August erfolgt, müsste er, um als Zweitfrucht definiert zu werden, spätestens bis zum 31. Dezember desselben Jahres geerntet werden. Dieses trifft für den Hanf im Winteranbau nicht zu, da die Ernte erst im Frühjahr des Folgejahres erfolgt. Eine Zwischenfrucht wird als zur Hauptfrucht dienende Gründüngung oder zur Nutzung als Tierfutter beschrieben. Beides trifft jedoch für den Winteranbau mit Fasernutzung nicht zu. Die BLE hat den Winteranbau von Hanf aufgrund der Ernte im Folgejahr vorerst den Winterzwischenfrüchten zugeordnet.

Nach der neuen Düngeverordnung (DüV) (BMEL 2017) darf der Hanf im Anbau als Winterzwischenfrucht mit maximal 60 kg N/ha (bzw. 30 kg NH<sub>4</sub>-N) ab Ernte der Hauptfrucht gedüngt werden. Bislange wurde der Anbau von Hanf als „Winterzwischenfrucht“ noch nicht in das Greening aufgenommen, um die Flächenprämie im Rahmen der EU-Agrarförderung zu erhalten. Jedoch bietet er neben den ökonomischen auch viele ökologische Vorteile:

- Auflockerung der getreideintensiven Fruchtfolgen (Graf *et al.* 2005a)
- Gute Vorfruchtwirkung durch Beikrautunterdrückung und Gareförderung (Bócsa *et al.* 2000, Haverkamp 2014))
- Keine Herbizid- und Fungizidanwendungen notwendig, daher auch für den biologischen Anbau geeignet (Röhricht & Schulz 2000, Zöphel *et al.* 2001a, Mielke & Schöber-Butin 2002)

- Auflockerung der Bodenstruktur (Mielke & Schöber-Butin 2002, Small 2003, Graf *et al.* 2005a)
- Erosionsschutz (vor allem im Winteranbau) (Amaducci *et al.* 2000)
- Rückzugsmöglichkeit und Deckung für Tierarten in den Wintermonaten
- Zusätzliche Wertschöpfung

In den folgenden Ausführungen wird der Anbau von Faserhanf, mit einer Aussaat im Juli und Ernte im Frühjahr des Folgejahres, als „**Winteranbau**“ definiert. Der klassische Anbau als Hauptfrucht mit der Aussaat im April/Mai und Ernte im Spätsommer wird als „**Sommeranbau**“ bezeichnet. Da es aufgrund der zuvor beschriebenen Umstände noch keine Vergleichswerte zum Winteranbau in der Literatur gibt, wird sich auf Berichte und Forschungsergebnisse aus dem konventionellen Sommeranbau bezogen. Die Einwirkung des Frostes auf die Faserqualität wird mit Ergebnissen der „Dry-line Methode“ aus Skandinavien verglichen.

### 3.4 Botanik

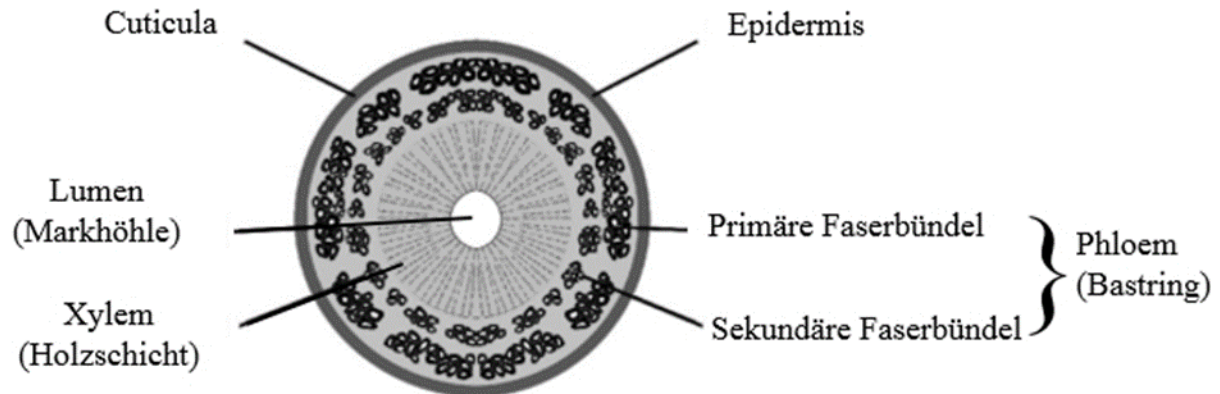
Hanf, *Cannabis sativa* L., ist eine krautige, zweikeimblättrige, einjährige Kulturpflanze, die aus den gemäßigten Breiten Zentralasiens stammt (Mielke & Schöber-Butin 2002). Er gehört zur Familie der Hanfgewächse (*Cannabinaceae*) und ist mit Hopfen (*Humulus lupulus* L.) und den Maulbeergewächsen (*Moraceae*) verwandt (Waskow 1995, Hanf 1997, Bócsa *et al.* 2000, Small 2003). Ausgewachsene Hanfpflanzen ertragen kurze Phasen bei Minustemperaturen bis  $-6^{\circ}\text{C}$ , jedoch keinen Dauerfrost (Small 2003).

Hanf ist in der ursprünglichen Form zweihäusig (diözisch), wodurch männliche und weibliche Blütenstände auf unterschiedlichen Pflanzen angesiedelt sind. Aufgrund des unterschiedlichen Wuchstyps und Abreifeverhaltens von weiblichen und männlichen Pflanzen, wurde der Faserhanf monözisch gezüchtet, um bei der Ernte eine einheitliche Reife der Hanfstängel und eine homogene Faserqualität zu erhalten (Reuter 1987). Während in Frankreich, Deutschland, Polen, Rumänien und Ukraine vorwiegend monözische Sorten gezüchtet werden, überwiegt in Ungarn, Italien, Spanien und dem ehemaligen Jugoslawien die Züchtung von diözischen Sorten (Sankari 2000a). Hanfpflanzen können Wuchshöhen bis 6 m erreichen (Mielke & Schöber-Butin 2002, Horne 2012). Schumann *et al.* (1999) und Flachowsky (2003) geben für Deutschland Pflanzhöhen zwischen 2 und 4 Metern im Sommeranbau an. Die Wurzeln können in lockeren, grundwasserfernen Böden bis zu 3 Meter tief wurzeln (Haney & Kutscheid 1975, Amaducci *et al.* 2008b), wohingegen auf grundwassernahen Böden nur ein flachgründiges Wurzelsystem ausgebildet wird (Small 2003). Die intensivste Wurzelbildung findet nach Hanf (1997) in den oberen 20-40 cm Boden statt. Die Hanfblätter sind fingerförmig gefiedert. Ein Blatt setzt sich aus 5-9 gezähnten Blattfingern zusammen. Die Blattmasse macht einen Anteil von 24-25 Prozent an der Gesamtpflanzenmasse aus (Gruber 2012).

Der Hanfstängel besitzt eine hexagonale Form und besteht aus Holz- und Bastgewebe. Das Bastgewebe ist mit Epidermiszellen und der Cuticula umschlossen. Im Phloem (Bastgewebe) werden durch primäres Wachstum zwischen 15 und 35 Faserbündel ausgebildet. Im weiteren



Wachstumsverlauf entstehen die sekundären Fasern. Zusammen umschließen sie das Xylem (Holzkörper). In den im Xylem eingeschlossenen Leitbündeln erfolgt der Wasser- und Nährstofftransport von den Wurzeln zu den Blättern (Roller 2009). In der Mitte des Xylems befindet sich die Markhöhle (Körber-Grohne 1987, Scheer-Triebel & Léon 2000, Bócsa *et al.* 2000, Amaducci *et al.* 2015) (Abbildung 3-1).



**Abbildung 3-1: Vereinfachter Querschnitt eines Hanfstängels, verändert nach Härkäsalmi (2006)**

Mit einsetzender Blüte, zum Ende des Längenwachstums liegen die Faserzellen in einem durchgängigen Ring um den Holzteil herum. Im Verlauf der Blüte organisieren sich die Fasern zu Bündeln, die durch das Phloemgewebe getrennt werden (Amaducci *et al.* 2005). Die Reife der einzelnen Faserzellen mit der Ausbildung von sekundären Zellwänden geschieht vom äußeren zum inneren Teil des Stängels, wodurch innerhalb eines Stängels Faserzellen mit unterschiedlichen Reifegraden gefunden werden können. Die primären Faserbündel durchziehen den gesamten Stängel, wohingegen die später ausreifenden sekundären Fasern nur etwa bis zur Stängelmittle reichen (Behr 2016). Die Sekundärfasern sind dadurch deutlich kürzer und auch weniger reißfest als die Primärfasern (Christen & Schulz 1997). Der Holzteil dient dem Stängel zur Standfestigkeit in senkrechter Richtung, wohingegen die Faserzellen die Zug-, Reiß- und Dehnungsfestigkeit bestimmen (Bócsa *et al.* 2000). Mit zunehmender Reife, verholzen auch die Faserzellen, durch die Einlagerung von Ligninen (Amaducci *et al.* 2005). Diese erhöhen die Druck- und Zugfestigkeit der Fasern, reduzieren aber die Dehnungsfestigkeit und die Elastizität (Sankari 2000b, Bickel-Sandkötter 2001, Marrot *et al.* 2013, Chernova *et al.* 2018).

Die Jugendentwicklung des Hanfes verläuft zunächst langsam. Ca. 4 – 5 Wochen nach der Keimung setzt ein schnelles Längenwachstum ein (Bócsa *et al.* 2000), bei dem tägliche Zuwachsraten von 2 bis 3 cm pro Tag beobachtet werden können (El-Ghany 2002). Beikräuter keimen später (Small 2003), werden überwachsen und beschattet, woraufhin diese durch Lichtmangel eingehen; eine Herbizidanwendung ist aus diesem Grund nicht notwendig (Veereet *et al.* 1995). Das Längenwachstum endet mit der Blütenbildung, die je nach Sorte von Anfang Juli bis Mitte August beginnt (Amaducci *et al.* 2005, Amadurcci *et al.* 2008a, Cosentino *et al.* 2012). Die Blüte dauert bis zu vier Wochen (Graf *et al.* 2005b). Die Bestäubung

erfolgt über den Wind (Small 2003, Haverkamp 2014). Der Hanf gehört zu den Kurztagspflanzen, (Borthwick & Scully 1954, Heslop-Harrison & Heslop-Harrison 1969, Bócsa *et al.* 2000). Das bedeutet, dass er ab einer bestimmten Tageslänge von der vegetativen in die generative Phase übergeht und mit einsetzender Blütenbildung das Längenwachstum einstellt (Mastel *et al.* 1998). Je nach Sortenart setzt diese bei einer Tageslänge unter 12 bis 16 Stunden ein (Horne 2012). Nykter (2006) und Clarke (1999) weisen die kritische Tageslänge zwischen 12 und 14 Stunden aus, wohingegen Struik *et al.* (2000) diese zwischen 14 und 15,5 h beobachteten. Daraus ergibt sich die Einteilung in frühe, mittelfrühe, mittelspäte, späte und sehr späte Sorten (Mediavilla *et al.*, 1999, Höppner & Menge-Hartmann 2000, Léon *et al.* 2004). Somit bringen frühreife Sorten aufgrund der kürzeren Wachstumszeit geringere Wuchshöhen und Ernteerträge hervor als spätreife Sorten (Höppner & Menge-Hartmann 2000, Mediavilla *et al.* 2000). Ertragsunterschiede zwischen den Sorten können bis zu 50 % betragen und sind dadurch deutlich höher als standortbedingte Ertragsunterschiede (Von Buttlar *et al.* 1997, Scheer-Triebel & Léon 2000). Die in der Literatur beschriebenen Erntemengen weisen sehr weite Spannen auf. Cochran (2000) führt Erträge zwischen 2 und 12,5 t/ha auf, während Crowley (2001) Erntemengen zwischen 10 und 14 t/ha beschreibt. Münzer (1999) und Mediavilla *et al.* (2000) fassen die Stroherträge zwischen 5-18 t/ha zusammen.

Die verschiedenen Hanfsorten zeigen eine sehr hohe Variabilität in Bezug auf Abreifeverhalten, Pflanzhöhe, Fasergehalt und Samenertrag. Aus diesem Grund muss bei der Sortenwahl der Verwendungszweck (Faser- oder Samennutzung) als auch die klimatischen Bedingungen des Anbaugbietes bedacht werden. Nach der Samenreife folgt die Seneszenz der Pflanzen, wonach sie Absterben. Zuerst vertrocknen die Blätter und später die Stängel (Röbber 2012). Die Fasergehalte des Hanfstrohs unterliegen einem weiten Schwankungsbereich, der sortenabhängig ist und zudem von den Umwelt- und Anbaubedingungen bestimmt wird. Bei modernen Sorten wird der Fasergehalt zwischen 25 und 35 % angegeben (Gusovius 2002). Sankari (2000b) gibt Faserhalte zwischen 18 und 26 % an, wobei diözische Sorten höhere Fasergehalte aufweisen als monözische Sorten. Die Inhaltsstoffe der Fasern setzen sich wie folgt zusammen: 60-70 % Zellulose, 15-20 % Hemizellulose, 2-4 % Lignin, 2-4 % Pektin und 1-2 % Wachse (Kymäläinen *et al.* 2001, Thygesen 2006).

### **3.5 Klima- und Bodenansprüche**

Hanf ist in der Lage, die Sonnenenergie effizienter als andere Kulturpflanzen zu nutzen und erreicht in einer kurzen Wachstumszeit Höhen von 3-6 Metern. Er gedeiht besonders gut in Zonen mit gemäßigttem Klima bei 13-22°C (Cochran *et al.* 2000), verträgt allerdings auch höhere und niedrigere Temperaturen (Fortenberry & Bennett 2001).

Der Wasserbedarf des Hanfes ist besonders während der Phase des schnellen Wachstums, in den Monaten Juni und Juli hoch (Bócsa *et al.* 2000, Graf *et al.* 2005a). Bócsa *et al.* (2000) geben 250 mm Niederschlag als nötige Niederschlagsmenge für diesen Zeitraum an. Bei Mediavilla *et al.* (2001) zeigten die Hanfpflanzen keinen Wasserstress bei einer Niederschlags-

menge zwischen 200 und 300 mm. Zöphel *et al.* (2001) geben für Sachsen eine Niederschlagsmenge für Mai bis August zwischen 300 und 500 mm an. Neben der Niederschlagssumme ist auch die Verteilung der Niederschlagsereignisse bedeutsam (Léon *et al.* 2004). Bei Reihenschluss bedecken die Hanfblätter den Boden so gut, dass sich die Erde und die Luftschicht unter den Blättern nur langsam erwärmen. Dadurch verringert sich die Evaporation stark, vor allem bei geringen Windbewegungen, so dass Hanf besser mit den gefallenen Niederschlägen haushalten kann als andere Kulturpflanzen (Roller 2009). Ehrensing (1998) beschreibt in Anbauversuchen in Europa einen Wasserbedarf der Hanfpflanzen zwischen 500-700 mm Niederschlag. Der Transpirationskoeffizient von 300-500 l/kg Trockenmasse (TM) (Bócsa *et al.* 2000, Graf *et al.* 2005a) ist mit dem von Gerste und Roggen (400-500 l/kg TM) vergleichbar. Damit liegt er nach Geisler (1988) über dem von *Miscanthus* (200-250 l/kg TM) oder Zuckerrübe (300-400 l/kg TM) und unter dem von Weizen (500-600 l/kg TM) oder Raps (600-700 l/kg TM).

Hanf benötigt einen lockeren, tiefgründigen Boden mit ausreichender Wasser- und Nährstoffversorgung. Lössstandorte, tiefgründige, lehmige Sande bzw. sandige Lehme sind besonders gut für den Hanfanbau geeignet. Ungeeignet sind dagegen staunasse Böden und verschlammungsgefährdete und verdichtete Standorte (Cochran *et al.* 2000, Graf *et al.* 2005a, Amaducci *et al.* 2015). Wichtig für eine optimale Wasserversorgung sind Böden, die aufgrund ihrer Struktur, eine optimale Durchwurzelung zulassen. Der Hanf vermag mit seinen Wurzeln bis in 3 m Bodentiefe vorzudringen, um seinen Wasserbedarf zu decken (Small 2002). Die intensivste Durchwurzelung findet zwischen einer Bodentiefe von 10 bis 50 cm statt (Hanf 1997, Amaducci *et al.* 2008a, Gruber 2012). Nach Graf *et al.* (2005) eignen sich sandige Böden mit Grundwasseranschluss besonders gut für den Hanfanbau.

Bis zur technischen Reife (ca. 110-115 Tage) ist eine Wärmesumme von 1800-2000°C notwendig (Prjanischnikow 1930; Bócsa *et al.* 2000). Frühreife Sorten brauchen ca. 300°C weniger (Roller 2009).

### 3.6 Aussaatstärke

Einzelne Hanfsamen keimen schon bei Bodentemperaturen von 1-2°C; die optimale Keimtemperatur wird zwischen 10 und 12°C angegeben (Mastel *et al.* 1998). Der Reihenabstand sollte je nach Saatstärke zwischen 8 und 20 cm liegen. Als Saattiefe wird zwischen 2 und 6 cm angegeben (Ehrensing 1998, Bócsa *et al.* 2000, Mielke & Schöber-Butin 2002, Graf *et al.* 2005a, Amaducci *et al.* 2015). Das Tausendkorngewicht variiert nach Sorte zwischen 17-23 g (Riegler-Nurschler 2009). Der Hanfsamen ist eine ovale Nuss, die zwischen 2,5 und 5 mm lang und 2-4 mm breit ist (Rößler 2012). Die Aussaatstärke ist bei Faserhanf eine wichtige Einflussgröße, die nicht nur die Faserquantität, sondern auch die -qualität bestimmt (Jakobey 1965, Dempsey 1975, Bócsa & Karus 1998, Struik *et al.* 2000, Amaducci *et al.* 2008a, Westerhuis *et al.* 2009).

Im Zusammenhang mit der Aussaatstärke zeigt Hanf das Phänomen der Selbstausdünnung (Self-Thinning-effect) (Weller 1987, Léon *et al.* 2004). Bei steigender Bestandesdichte kommt es durch die Konkurrenz zu Wasser, Licht und Raum zur Reduktion der Pflanzenzahl durch eine Dichte-induzierte Sterblichkeit der Pflanzen innerhalb der Wachstumsperiode (Van der Werf *et al.* 1995c, Meijer 1995, Lisson & Mendham 2000). Je nach Aussaatstärke wurde eine Reduzierung der Pflanzenzahl bis zu 60 % beobachtet (Mediavilla *et al.* 1998a, Von Franken-Welz 2003). Röhricht & Schulz (2000) beschreiben eine verstärkte Bildung von „Unterhanf“, der im Wachstum zurückbleibt, überschattet wird und letztendlich abstirbt. Bei den meisten angebauten Feldfrüchten, wie z.B. Winterweizen, Raps oder Mais, ist die optimale Pflanzendichte, um einen hohen ökonomischen Gewinn zu erhalten, noch nicht hoch genug, um einen Selbstausdünnungseffekt zu bewirken (Van der Werf *et al.* 1995c). Angaben zu optimalen Aussaatstärke für den Sommeranbau von Faserhanf sind sehr variabel und richten sich nach der weiteren Verwendung (Amaducci *et al.* 2015). Sie reichen von 40-150 kg Saatgut/ha (Röhricht & Schulz 2000), 40-45 kg/ha (Van der Werf *et al.* 1995c), 50 kg/ha (Crowley 2001) und 40-140 kg/ha (Dempsey 1975). Für Westeuropa geben Kozłowski *et al.* (1995) und Low (1995) Aussaatstärken von 50-70 kg an. Für die Fasernutzung in Deutschland empfehlen Lohmeyer (1997), Krüger (2000) und Münzer (1999) eine Aussaatmenge von 40 kg/ha; eine Erhöhung der Aussaatstärke konnte keinen Mehrertrag induzieren. Ausgehend von einem durchschnittlichen Tausendkorngewicht von 20 g, entsprechen 10 kg Saatgut pro Hektar 50 Pflanzen pro Quadratmeter. Die Aussaatstärke richtet sich auch nach der weiteren Nutzung der Fasern. Höhere Saatstärken werden für die textile Verwendung empfohlen (250-350 Pflanzen/m<sup>2</sup>). Für nicht-textile Anwendungen z.B. für Papierzellstoff werden ca. 90 Pflanzen/m<sup>2</sup> angegeben (Starčević 1996).

Mit steigender Pflanzendichte, erhöht sich der Faseranteil der Pflanzenstängel (Heuser 1927, Jakobey 1965) und die Feinheit der Fasern verbessert sich (Van der Werf *et al.* 1995c). Bei hohen Aussaatstärken wachsen kleinere Pflanzen mit dünneren Stängeln, wodurch die Bruchgefahr aufgrund der mechanischen Instabilität steigt (Höppner & Menge-Hartmann 1994, Krüger 2000, Lisson & Mendham 2000). In hohen Aussaatstärken verkürzt sich der Zeitraum vom Auflaufen der Pflanzen bis zur Reihenschluss. Der Blühbeginn verzögert sich, da mehr Stoffwechselprodukte im Stängel als im Blütenstand und den Blättern eingelagert werden (Van der Werf *et al.* 1995c). In niedrigen Aussaatstärken von 20 bis 30 kg/ha beschreibt Crowley (2001) signifikant stärkere Stängel, die einen Durchmesser von mehr als 10 cm aufwiesen. Die Stängel sollten einen Durchmesser von zehn Millimeter allerdings nicht überschreiten, da ansonsten die technische Aufbereitung schwieriger und energieintensiver (Graf *et al.* 2006).

### 3.7 Hauptnährstoffbedarf und Düngung

Stickstoff ist für den Faserhanf das wichtigste Nährelement, wobei der Bedarf in den ersten sechs bis acht Wochen am größten ist (Kraenzel *et al.* 1998). Ein zu geringes Stickstoffangebot führt zu einem rascheren Übergang in die generative Phase und reduziert damit den Ertrag (Höppner & Menge-Hartmann 1994, Mediavilla *et al.* 1998, Léon *et al.* 2004). Zu hohe Stickstoffgaben beeinflussen den Fasergehalt negativ, da durch eine mangelhafte Ausbildung der Faserzellwände die Reißfestigkeit der Fasern abnimmt (Mielke & Schöber-Butin 2002).

Die Stickstoffmengen für den Sommeranbau werden von Bócsa *et al.* (2000) mit 15-20 kg Stickstoff pro Tonne Ertrag angegeben. Mastel *et al.* (1998) geben einen Mehrertrag von bis zu 20 % pro Hektar an, wenn die Stickstoffgabe von 80 auf 120 kg/ha erhöht wird. Bei noch höheren N-Gaben wird der Bestand ungleichmäßiger (Van der Werf & Van den Berg 1995a). Eine organische Düngung mit Gülle und Stallmist wird vom Hanf gut angenommen, da sich die langsame Freisetzung des Stickstoffs aus dem Düngegut dem zeitlichen Nährstoffbedarf der Pflanzen anpasst (Graf *et al.* 2005a). Stickstoff wird insbesondere in die Blattmasse eingebaut, wo er als Bestandteil des Chlorophylls die Assimilation beeinflusst. Des Weiteren ist Stickstoff Baustein in Proteinen, Proteiden und Nucleinsäuren (Marschner 1995, Pandey 2015). Die Aufnahme erfolgt bis zur Samenreife (Haverkamp 2014).

Phosphor wird zwischen 1,7 bis 2,2 kg pro Tonne Ertrag und Hektar benötigt (Bócsa *et al.* 2000). Er spielt eine wichtige Rolle in der Ausbildung der Fasern, da er die Elastizität und Reißfestigkeit der Faserzellen und -bündel positiv beeinflusst. Auch Kalium hat einen wichtigen Einfluss auf die Qualität der Hanffasern. Als Bedarf werden 12,4-16,6 kg Kalium pro Tonne Ertrag und Hektar angegeben (Bócsa *et al.*, 2000).

Für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit sind neben der richtigen Fruchtfolge und einer sachgemäßen Bodenbearbeitung auch eine ausreichende Versorgung mit humusliefernden Stoffen und eine ausreichende Düngung von Nöten (Germann 1979). Laut der Düngeverordnung müssen Betriebe, die mehr als 10 ha landwirtschaftliche Fläche besitzen und intensiv düngen (mehr als 50 kg N/ha und 30 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha) die Düngebedarfsermittlung schriftlich dokumentieren. Dazu muss vor dem Ausbringen von Düngemitteln bis zum 31. März für Stickstoff jährlich, für Phosphat spätestens alle 6 Jahre, eine Bodenuntersuchung zur Bestimmung des Nährstoffgehaltes durchgeführt werden. Bei zu hohen Nährstoffgaben besteht die Gefahr der Auswaschung ins Grundwasser, welches zu einer Belastung bei Trinkwassernutzung führen kann. Für Stickstoff wird eine Untersuchung des mineralisierbaren Stickstoffs im Boden durchgeführt. Dieser setzt sich aus Ammonium- und Nitrat-Stickstoff zusammen, welche einen Anteil zwischen 0,5 und 5 % am Gesamt-N des Bodens ausmachen. Der mineralisierbare Stickstoff (N<sub>min</sub>) wird in kg/ha angegeben. Im Betriebsdurchschnitt dürfen pro Hektar 170 kg Stickstoff gedüngt werden (LWK NRW 2017). Nach der letzten Hauptfrucht und zu Zwischenfrüchten, die nicht vor dem Winter geerntet werden, war die Stickstoffdüngung auf 40 kg Ammonium-N oder 80 kg Gesamt-N/ha begrenzt. Mit der Novellierung der Düngeverordnung vom 02.06.2017 wurden die Stickstoffgaben bis zum 01. Oktober zu Winterraps,

Zwischenfrüchten, Feldfutter oder Wintergerste nach Getreide auf 30 kg/ha  $\text{NH}_4\text{-N}$  bzw. 60 kg/ha Gesamt-N reduziert, zugunsten des Gewässerschutzes und der Luftreinhaltung (BMEL 2017), wodurch die EG-Nitratrichtlinien umgesetzt werden und auch für den Anbau von Hanf als Winterzwischenfrucht seine Gültigkeit findet. Die Düngebedarfsermittlung für Stickstoff auf Acker- und Grünland wird damit bundeseinheitlich. Diese oblag bisher den Landwirtschaftskammern der Bundesländer. Da Stickstoff aufgrund seiner einfach negativen Ladung sehr mobil im Bodenprofil ist, werden für die  $\text{N}_{\text{min}}$ -Untersuchung die Gehalte bis 90 cm betrachtet. Nitrat ist durch seine einfache negative Ladung und durch seine geringe Molekülgröße im Boden sehr mobil und kann dadurch schnell von den Pflanzen über die Wurzel aufgenommen werden, jedoch auch mit dem Sickerwasser in das Grundwasser eingetragen werden, wo es zu einer Belastung werden kann. Eine Adsorption bzw. Desorption findet im Boden daher kaum statt (Amlinger *et al.* 2006). Mögliche Abweichungen davon, können durch Verlagerungsprozesse und Staunässe bzw. Grundwassereinfluss bedingt sein. Bei Abwesenheit von Sauerstoff kann Nitrat durch Denitrifikationsprozesse wieder zu molekularem Stickstoff oxidiert werden.

Zur Ermittlung der optimalen Düngemenge der weiteren Hauptnährstoffe (Phosphor, Kalium), werden Ackerböden nach Nährstoffgehaltsklassen eingeordnet. Dabei wird in fünf Gehaltsklassen von A (sehr niedrig) bis E (sehr hoch) unterteilt (Anhang 2). Anzustreben ist dabei die Gehaltsklasse C. Des Weiteren spielt die Bodenart eine Rolle, da je nach Tonmineralart unterschiedlich viele Nährstoffe gespeichert werden können. Die Angaben der Richtwerttabellen erfolgen jeweils in mg pro 100 Gramm Boden. Die Empfehlungen für die Nährstoffgehalte beziehen sich immer auf den Oberboden (0-30 cm), da dieser den Bereich des effektiven Wurzelraumes darstellt, aus denen die landwirtschaftlichen Kulturpflanzen die größte Menge an Nährstoffen aufnehmen (Landwirtschaftskammer NRW 2015).

Die Gehaltsklassen für Phosphor wurden durch die Land- und Forschungsanstalten (LUFA) der Bundesländer eigenständig für ihre Region bestimmt, wobei sich die Grenzwerte erheblich unterschieden (Anhang 3, Steffens 2009). Über mehrjährige, deutschlandweite Feldversuche konnte der Zusammenhang zwischen den Gesamt-Phosphorgehalten im Boden, dem pflanzenverfügbaren Phosphor, sowie dem Phosphorentzug durch die Pflanzen einheitlicher beschrieben werden. Zudem konnte der Einfluss von Standortfaktoren, wie z.B. physikalische und chemische Bodeneigenschaften oder Klima nicht belegt werden. Aus diesem Grund wurde 1997 für alle LUFA vorgeschlagen, einheitliche Bodengehaltsklassen für Phosphor zu verwenden (Anhang 4). Jedoch ist dies nur ein Vorschlag, die gültigen Richtwerte liegen bei den Landwirtschaftskammern der einzelnen Bundesländer und sind für die Gehaltsklasse C im Anhang dargestellt. Da die Belastung des Grundwassers und von Gewässerflächen mit Phosphor in Regionen mit intensiv genutzter Landwirtschaft zunimmt, wird diskutiert, die Phosphorgehalte der Gehaltsklasse C auf maximal 6 mg/100 g Boden zu reduzieren (Anhang 5, Arden 2018).

Die Aufnahme von Phosphor durch die Pflanze erfolgt als Hydrogenphosphat ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) und als Dihydrogenphosphat ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ). Er dient als Baustein für die Erbsubstanz und zahlreichen Enzymen, die u.a. an der Photosynthese und Energiestoffwechsel beteiligt sind. Zudem wird Phosphor in Proteinen eingebaut. Als Bestandteil der Phospholipiden beeinflusst er die Stabilität und die Eigenschaften der Zellmembranen (Frossard *et al.* 2004, Pandey 2015). Damit ist Phosphor bestimmend für die Reißfestigkeit und Elastizität der Faserzellen im Hanf-anbau (Bocsá *et al.* 2000).

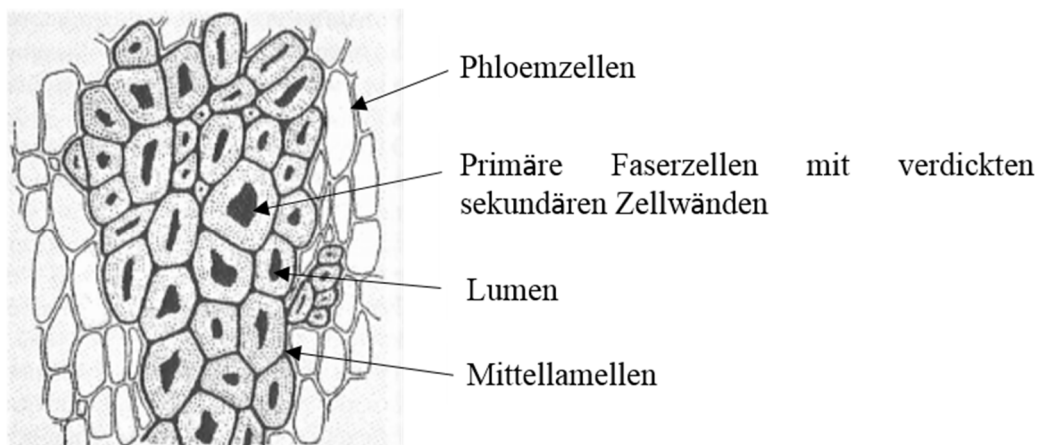
Die Kaliumgehalte im Boden werden ebenfalls wie die Phosphorgehalte in fünf Gehaltsklassen eingeteilt. Auch hier werden von den einzelnen Bundesländern zum Teil sehr unterschiedliche Düngeempfehlungen gegeben. Um einer Verunsicherung bei den Landwirten entgegenzuwirken, hat die VDLUFA eine vereinheitlichte Tabelle für die Kaliumdüngung herausgegeben (Anhang 6). Kalium ist im Boden an die Tonminerale gebunden, weshalb in die Gehaltsklassen die Bodenart und der damit verbundene Tongehalt einbezogen werden. Auf tonarmen, sandigen Böden besteht die Gefahr der Verlagerung von Kalium in tiefere Bodenschichten. Auf sehr tonreichen Böden kann Kalium sehr stark an die Tonminerale gebunden sein und durch die Fixierung in seiner Verfügbarkeit eingeschränkt sein (Jungk & Claasen 1986, Jalali & Kolahchi 2008, Ahl *et al.* 2016). Kalium ist in der Pflanze vor allem für die Regulierung des Wasserhaushaltes und Aufrechterhaltung des Turgordruckes zuständig (Marschner 1995, Pandey 2015). Dafür wird es jedoch nicht in die organische Substanz eingebaut, sondern ist als freies Ion in der Vakuole der Zellen vorhanden (Maiwald & Frank 1936, Schmid 1941). Des Weiteren werden wichtige Enzyme, z.B. für die Stärkesynthese und Proteinsynthese, durch die Anwesenheit von Kalium stimuliert (Marschner 1995). Aufgrund seiner Salzwirkung kann es die Frostresistenz einer Pflanze erhöhen. Dies spielt aber für den Hanf im Winteranbau keine Rolle, da er bereits im Herbst, vor den ersten Frösten abstirbt, wobei das Kalium aus den abgestorbenen Pflanzenteilen ausgespült wird (Industrieverband Agrar 2009). Eine gute K-Versorgung wirkt sich positiv auf das Stützgewebe der Pflanzen aus (Maiwald & Frank 1936). Nach Heuser (1927) erhöht Kalium den Faserertrag und trägt zu einer Verbesserung der Reißfestigkeit bei.

### 3.8 Ernte und Röste

Der optimale Erntezeitpunkt für Faserhanf ist im europäischen Raum ca. 120 Tage nach der Aussaat, wenn sich die Pflanzen in der Blüte befinden bzw. kurz danach (Mielke & Schöber-Butin 2002, Amaducci *et al.* 2008a, Graf *et al.* 2005a). In Studien aus Amerika wird dieser bereits 70 bis 90 Tage nach der Aussaat angegeben (Fortenberry & Bennett 2001, Averink 2015). In Europa liegt die Erntezeit zwischen Mitte August und Ende September (Horne 2012). Allerdings ist durch das EU-Gesetz vorgegeben, dass der Hanf erst nach der Blüte, mit einsetzender Samenbildung geerntet werden darf, unabhängig von seiner Verwendung (Mediavilla *et al.* 1998b). Erst nach Erhalt des Freigabeschreibens von der BLE oder nach durchgeführter Kontrolle kann mit der Ernte des Hanfes begonnen werden. Zuvor muss der Beginn

der Blüte anhand des Blümelde-Formulars der BLE gemeldet werden.

Bei der Ernte sind die Stängel noch grün und besitzen je nach Wetterlage einen Wassergehalt zwischen 20 und 30 % (Mastel *et al.* 1998). Die Faserzellen sterben während der Blüte ab, wenn durch Lignin-Einlagerung eine bestimmte Zellwanddicke erreicht worden ist, wodurch die Weiterleitung von Wasser und Nährstoffen unterbrochen wird (Amaducci *et al.* 2005). Durch die Röste werden die Faserbündel von der Epidermis und Phloemgewebe abgelöst (A-bot *et al.* 2003). Zwischen den Faserzellen befinden sich Mittellamellen, die überwiegend aus Pektinen besteht und bei der Röste durch Mikroorganismen abgebaut wird. (Gusovius 2002) (Abbildung 3-2).



**Abbildung 3-2: Querschnitt eines Faserbündels, verändert nach Herzog (1927)**

Nach dem Abmähen wird das Stroh üblicherweise ins Schwad gelegt und zum Erhalten einer gleichmäßigen Röste zwei- bis dreimal gewendet. Unter Einwirkung von UV-Strahlung, durch den ständigen Wechsel von Austrocknung und Wiederbefeuchtung, durch Tau und möglichen Niederschläge, sowie durch den mikrobiellen Abbau (Scheer-Triebel & Léon 2000), verfärben sich die Stängel hin zu hellbeige bis ockerbraun. Während der Liegezeit von Hanf im Schwad werden zwei Phasen unterschieden. In der 1. Phase, der Abtrocknungsphase, soll ein Abtrocknen auf unter 15 % erfolgen. In der 2. Phase, der Röstphase, kommt es infolge von Tau- und Witterungseinflüssen zu einem Wechsel von Wiederbefeuchtung und Abtrocknung im Hanfswad (Gusovius *et al.* 1998, Hahn *et al.* 2000). Die Feldröste dauert je nach Wetterlage zwischen 2 und 8 Wochen. Ihre Vorteile liegen in den geringen Kosten und Durchführung vor Ort. Als Nachteil wirken sich die geringen Kontrollmöglichkeiten durch den Anbauer aus und dass das Feld wegen der Belegung nicht neu bestellt werden kann (Horne 2012). Durch ein zu häufiges Wenden wird der Röst- und Trocknungsprozess jedoch nicht beschleunigt, sondern birgt eher die Gefahr, dass das Erntegut zerfasert wird und bereits Schäben auf dem Acker verbleiben. Bei zu starken Herbstniederschlägen bleibt das Erntegut zu feucht, wodurch die Aufbereitung erschwert wird, bzw. die Gefahr der Verschimmelung birgt. Unter trockenen Witterungsbedingungen verläuft die Röste langsamer (Gusovius *et al.* 1999). Der optimale Röstgrad des Hanfstrohs ist erreicht, wenn die Kittsubstanzen, wie Lignin und Pektin größtenteils durch Mikroorganismen abgebaut sind und sich



somit die Faser leicht vom Holzteil trennen lässt. Durch die Feldröste, die ein natürlicher Prozess ist und stark wetterabhängig ist, entstehen Fasern von unterschiedlicher Qualität. Während der Röste besiedeln Pilze und Hefen die Hanfstängel und produzieren Enzyme, die Polysaccharide zersetzen, die die Phloemzellen aufweichen und zerstören (Thygesen 2006). Durch den Pilzgefall verfärben sich die Stängel gräulich, welches als Güte für die Röste angesehen wird (Fuller 1946). Die Faserzellen sollten allerdings von mikrobiellen Abbauprozessen größtenteils verschont bleiben, um die Qualität der Faser nicht zu mindern (Mastel *et al.* 1998). Um eine leichte Verarbeitung zu gewährleisten und eine Zwischenlagerung des Ernteguts zu ermöglichen, sollte dieses nach der Trocknung einen homogenen Wassergehalt zwischen 14 und 18 % besitzen (Léon *et al.* 2004, Hoffmann 2013).

Bei der Röste über den Winter nutzt man den Frost für die Ablösung der Fasern vom Holzteil. Dabei reicht ein Frostereignis bereits aus, um durch den mechanischen Stress infolge der Eisausdehnung am Stängel, die Primärfasern vollständig vom Stängel abzutrennen (Pasila 2004). Diese liegen kaum bzw. nicht mehr im Verbund vor, wodurch die Fasern im Frühjahr überröstet sind, wodurch sich Ernteverluste bis zu 40 % ergeben können (Pasila 2000). Bei der Röste über den Winter, weisen die Hanfstängel im folgenden Frühjahr einen optimalen Wassergehalt von unter 15 % auf und können ohne weitere Trocknung direkt in Ballen gepresst werden (Pasila 2000). Die frostgerösteten Hanfstängel sind relativ resistent gegenüber Verschimmelung, da die Nährstoffgehalte während der Röste abnehmen (Nykter 2006). Die Winterernte fällt in eine Zeit mit weniger Arbeit auf den landwirtschaftlichen Betrieben, im Gegensatz zur Ernte des Sommeranbaus. Hier kommt es zu Arbeitsspitzen aufgrund von Ernteüberschneidungen mehrerer Kulturarten, sowie Saatbettbereitung für die Folgefrucht. Die Stand- und Froströste über den Winter kann auch als Alternative im Sommeranbau, bei schlechten Wetterlagen im Herbst, genutzt werden (Hoffmann 2013).

### 3.9 Faserqualität

Pflanzenfasern zeigen eine große Streuung in Bezug auf ihre mechanischen Eigenschaften, die den Einsatz in Verbundwerkstoffen erschweren (Abot *et al.* 2013). Die Wachstumsbedingungen (Bestandesdichte, Wasserversorgung, Düngung) der Hanfpflanzen haben einen großen Einfluss auf das Stängelwachstum und die Ausbildung der Faserzellen. Die Pflanzendichte und der Erntezeitpunkt wirken sich dabei am stärksten auf die Quantität und Qualität der Fasern aus (Van der Werf *et al.* 1995c, Struik *et al.* 2001, Mediavilla *et al.* 2001, Amaducci *et al.* 2002). Des Weiteren wird die Faserqualität von der Länge und Intensität der Feldröste bestimmt (Hahn 2000), die wichtig für die Trennung der Fasern vom Holzteil ist. Der Holzteil wird im maschinellen Prozess der Entholzung gleichmäßig gebrochen, wobei die zerkleinerten Teilchen als Schäben bezeichnet werden. Sie sind ein Nebenprodukt der Fasererzeugung und finden vorwiegend als Tiereinstreu Verwendung.

Als Qualitätsparameter für Fasern werden zum einen optische Verfahren zur Bestimmung des Röstgrads, der Faserbreite und Faserfeinheit, sowie mechanische Parameter (Zugfestigkeit,

Zugmodul, Bruchdehnung) herangezogen. Die Faserfeinheit stellt den Reifegrad einer Faser dar und wird als die Dicke der Zellwand in Abhängigkeit ihres Durchmesser oder Umfangs beschrieben (Graupner 2014). Sie wird als Masse bezogen auf eine bestimmte Länge (Umfang, Querschnitt, Durchmesser) in Tex angegeben ( $\text{tex} = \text{g}/1000 \text{ m}$ ). Die mechanischen Eigenschaften sind von Bedeutung, um später als Kennwerte z.B. für Faserverbundwerkstoffe dienen zu können. Im Zugversuch unter Normbedingungen (DIN EN ISO 5079) ergeben sich charakteristische Spannungs-Dehnungs-Kurven, aus denen unter Berücksichtigung der Faserquerschnittsflächen verschiedene Parameter (Zugfestigkeit, Zugmodul, Bruchdehnung) berechnet werden können. Die Zugfestigkeit beschreibt dabei die maximale mechanische Zugspannung, die die Fasern/der Werkstoff aushält. Die Bruchdehnung gibt die bleibende Verlängerung der Zugprobe nach dem Bruch, bezogen auf die Ausgangsmesslänge in Prozent an (Sankari 2000a). Aus der Spannungs-Dehnungs-Kurve kann der Zugmodul (auch Elastizitätsmodul (E-Modul)) berechnet werden, der als die Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve definiert wird (Graupner 2014). Die Qualitätsanforderung seitens der Industrie ist bislang nicht genau definiert und richtet sich nach dem angewendeten Verfahren. Von Francken-Welz *et al.* (2003) beschreiben für gepresste Formteile, dass große Faserbreiten zu höheren Zugfestigkeiten führen als Fasern mit hoher Feinheit. Bei gespritzten Formteilen wirkt sich eine hohe Bruchdehnung negativ auf. Auch eine hohe Zugfestigkeit führt zu einem geringeren Zugmodul des Spritzkörpers. Je nach Art des Verbundwerkstoffes, sowie seiner Anwendung müssen die Qualitätseigenschaften modifiziert und optimiert werden.

Die typischen Kennwerte für Qualitätsparameter von Faserhanf, die in der folgenden Arbeit ausgewertet wurden, fassen Müssig *et al.* (2010) aus Literaturangaben (Tabelle 3-1) zusammen.

**Tabelle 3-1: Morphologisch und mechanische Eigenschaften von Faserhanf, Literaturangaben, verändert nach Müssig *et al.* (2010)**

Eigenschaft	Literaturangaben
Faserbündelbreite [ $\mu\text{m}$ ]	25 - 500
Zugfestigkeit [MPa]	310 - 1110
Zugmodul [MPa]	3000 - 90000
Bruchdehnung [%]	1,3 - 6,0

## 4 Versuchsstandorte

### 4.1 Landwirtschaftliche Versuchsflächen

#### 4.1.1 Lage und Geologie

Im Rahmen der Arbeit wurden die landwirtschaftlichen Flächen von zwei Agrarbetrieben genutzt, die im Vorfeld bereits Erfahrungen im Anbau von Faserhanf hatten. Die Flächen, die zu den üblichen Praxisbedingungen in Fruchtfolgerotation bestellt wurden, lagen zum einen in Mecklenburg-Vorpommern, in der Mecklenburgischen Seenplatte, nahe des Ortes Lärz, zum anderen in Nordrhein-Westfalen, im Münsterland, in der Nähe der Stadt Versmold (Abbildung 4-1). Nach geologischer Einheit sind die Versuchsstandorte dem Norddeutschen Tiefland zuzuordnen, welches im Pleistozän (2,5 Mio. Jahre bis 10000 Jahre vor heute) durch verschiedene Eisvorstöße von Norden aus überfahren wurde (Henningsen & Katzung 2002, S. 166-187). Die unterschiedlich weite Ausdehnung der Eismassen in den drei Inlandvereisungen (Elster-, Saale- und Weichseleiszeit) bewirkte eine mehr oder weniger starke glaziale Überformung der Landschaft (Liedtke & Marcinek 2002, S.386-461). Diese wird großräumig in die Alt- und Jungmoränenlandschaft untergliedert. Die quartären Lockersedimente weisen eine Mächtigkeit von wenigen Metern bis zu stellenweise 500 Metern auf, die mit Annäherung an die Mittelgebirge abnimmt (Henningsen & Katzung 2002, S. 166-187).

Der Standort Lärz liegt im Gebiet der Jungmoränenlandschaft und befindet sich ca. 30 km südwestlich von Neustrelitz, süd-östlich des Müritzsees, 62 m über NHN. Aufgrund der weichseleiszeitlichen Überprägung, entstand das heutige Hügelland mit zahlreichen Seen (Liedtke & Marcinek 2002, S.386-461).

Die landwirtschaftlichen Praxisversuche wurden in Nordrhein-Westfalen nahe der Stadt Versmold, ca. 30 km westlich von Bielefeld entfernt, durchgeführt. Sie werden der Münsterländischen Tieflandsbucht zugeordnet, die im Nordosten durch den Teutoburger Wald und im Süden vom Rheinischen Schiefergebirge begrenzt wird. Versmold erreicht eine Höhe von ca. 75 m über NHN und befindet sich im Randbereich des Beckens. Dort geht die Bockhorster Lehmplatte in den Versmolder Heidegürtel über, der auf einer Grundmoräne der Saaleeiszeit liegt (Meynen & Schmidhüsen 1959). Die Landschaft wurde im Drenthe-Stadial während der Saale-Eiszeit geprägt, bei dem es zwei große Eisvorstöße aus Nordwesten gab (Kuntze *et al.*, 2002: 82-83), die die Sanderflächen im Süden des Teutoburger Waldes bildeten (Liedtke & Martinek 1994: 386-461).

Am Versuchsstandort Versmold wurden zwei Versuchsflächen mit unterschiedlichen Bodentypen- und -arten für den Hanfanbau ausgewählt, die in der folgenden Arbeit als Versmold 1 (lehmiger Boden) und Versmold 2 (sandiger Boden) bezeichnet werden.



Abbildung 4-1: Lage der Versuchsstandorte nach geologischer Einheit (Müller & Richert, 2010)

### 4.1.2 Klima

Die Wetterdaten wurden von möglichst nahegelegenen Wetterstationen herangezogen. Die Klimadaten des langjährigen Mittels wurden für den Standort Lärz von der Wetterstation des Deutschen Wetter Dienstes (DWD) in Waren abgefragt. Während der Feldversuche konnten die Daten der hofeigenen Wetterstation, der ca. 10 Kilometer entfernten Agrar GmbH Vip-perow in Priborn, genutzt werden. Für den Standort Versmold wurden die Niederschlagsdaten der Regenmessstation Versmold verwendet. Die nächstgelegene Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes, die Temperaturdaten liefern konnte, befindet sich im knapp 30 Kilometer entfernten Bielefeld-Deppendorf, von der auch die Daten für das langjährige Mittel herangezogen wurden.

Der Standort Lärz liegt in einer Region, die sich in der Übergangszone zwischen ozeanischen und kontinentalen Klima befindet, welches auch als „Mecklenburg-Brandenburgisches Übergangsklima“ bezeichnet wird. Durch den hohen Gewässer- und Waldanteil konnte sich ein spezielles Makroklima entwickeln, welches sich besonders auf die Niederschlags- und Temperaturwerte auswirkt. Dieses Makroklima wird sehr stark vom Müritzsee beeinflusst. Am West- und Nordufer werden deutlich höhere Niederschläge verzeichnet als am Ostufer, in dessen Nähe sich auch der Standort Lärz befindet. Von Juni bis in den Winter hinein liegen die Temperaturen durch die erwärmten Wassermassen des Sees etwas höher als im Umland, im Frühjahr durch das stark abgekühlte Gewässer etwas niedriger (Heinzel 2018). Die Jahresmitteltemperatur beträgt 8,9°C, wobei der kälteste Monat der Januar mit 0,2°C ist und der wärmste Monat auf den Juli mit 18,3°C fällt (Anhang 7). Das Klima ist ganzjährig humid. Die niederschlagsreichste Zeit fällt auf die Sommermonate von Juni bis August, welches für den Winteranbau von Hanf von Vorteil ist, da zur Keimung genug Wasser verfügbar sein muss. Die jährliche Niederschlagssumme von 591 mm liegt deutlich unter dem deutschen Mittel von ca. 700 mm, da der Müritzsee bei Westwind als Regenfänger wirkt und die Wolken häufig vor der Gewässerfläche abregnen.

Versmold liegt im Bereich des subatlantischen Seeklimas, wodurch ganzjährig ein humides Klima herrscht, mit relativ milden Wintern und mäßig warmen Sommern. Die Jahresdurchschnittstemperatur aus dem langjährigen Mittel der Jahre 1981-2010 beträgt 9,6 °C und wurde von der Wetterstation Bielefeld-Deppendorf aufgezeichnet (Anhang 8). Dabei ist der Juli mit 18,2 °C der wärmste Monat, wohingegen mit 1,9°C der Januar den kältesten Monat im Jahr darstellt. Die Niederschlagssumme liegt mit 819 mm über dem deutschen Mittel von 700 mm. In den Wintermonaten von November bis Januar fallen im langjährigen Mittel die höchsten Niederschlagsmengen; die geringsten Niederschlagsmengen werden wie am Standort Lärz im April gemessen.

### 4.1.3 Bodenkundliche Standortaufnahme

Auf den Versuchsflächen wurde jeweils ein Bodenprofil ausgehoben, um die Bodeneigenschaften zu charakterisieren. Dazu wurden die Formblätter für die Profilaufnahme aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 5. Auflage, 2005) verwendet (Anhang 9-Anhang 11). Anschließend wurden horizontweise Stechzylinderproben zur Lagerungsdichtebestimmung sowie Bodenproben zur Ermittlung der Gesamtnährstoffgehalte, der pH-Werte und der elektrischen Leitfähigkeit entnommen. Die Bestimmung der Bodenart erfolgte mittels Fingerprobe anhand von Körnigkeit, Bindigkeit und Formbarkeit (KA 5, Tabelle 29 und 30). Die Bodenfarbe wurde unter Zuhilfenahme der MUNSELL Soil Color Charts erfasst.

Die sandigen Böden der Gemarkung Lärz entstanden durch Schmelzwasserablagerungen und weisen nur sehr geringe Anteile an Lehm bzw. Schluff auf. Sie werden nach der Karte der Bodenregionen (1:5.000.000) und Bodengroßlandschaften (BGL 5000) der Bodengroßlandschaft der Sander und trockenen Niederungssande, sowie der sandigen Platten und sandigen Endmoränen zugeordnet. Die Leitböden dieser Region sind Braunerden, Podsole, Parabraunerden, Gleye und Regosole.

Das auf der Versuchsfläche ausgehobene Bodenprofil ist ein Braunerde-Regolsol über Gley aus Lehmsand (Abbildung 4-2). Der Oberbodenhorizont ist dunkelbraun und stark humos und durch regelmäßige Bodenbearbeitung geprägt. Die Pfluggrenze befindet sich in einer Bodentiefe von ca. 37 cm und zeichnet sich aufgrund der Farbänderung von dunkelbraun zu gelb deutlich ab. Es folgt ein geringmächtiger Verzahnungshorizont von humosem Oberbodenmaterial und einem leicht verbräunten Unterbodenhorizont. Die Bodenart ist ein schwach lehmiger Sand, der ein schwach verfestigtes Einzelkorn- bzw. Kittgefüge aufweist. Darauf folgt ab einer Bodentiefe von 52 cm bereits das verwitterte Ausgangsmaterial. Dieses besitzt eine schmutzig graue Farbe und besteht ebenfalls aus schwach lehmigem Sand. Der anschließende Untergrundhorizont zeigt durch den Grundwassereinfluss oxidative Merkmale in Form einer dunkel- und hellrostfarbenen Fleckung mit einem Flächenanteil von ca. 30 % (Anhang 9). Da es aus technischen Gründen nicht möglich war, das Bodenprofil tiefer als 105 cm auszuheben, kann der darunterliegende Gley nicht detaillierter beschrieben werden. Das ganze Bodenprofil ist carbonatfrei und weist nur einen geringen Anteil an unbelebten Wurzelgängen auf. In Abbildung 4-2 ist zu erkennen, dass der Hanf sehr flachgründig wurzelte und somit seine Nährstoffe hauptsächlich aus dem Ap-Horizont aufnahm.

Die Bodenzahl dieser Fläche liegt zwischen 43 und 51. Diese setzt sich zusammen aus der diluvialen Entstehung mit der Zustandsstufe 2 und der Bodenart anlehmiger Sand. Aufgrund der Grundwassernähe und des dicht gelagerten Sandes, müssen für die Ackerzahl Abschläge gemacht werden, so dass sich für diese Fläche nur ein Wert von 29 ergibt.





## Braunerde-Regosol über Gley aus glazigenem Lehmsand

BB-RQ/GG: g-sl (Sg)

Tiefe	Horizontsymbol	Beschreibung
0-37 cm	Ap	Dunkelbrauner, stark humoser Oberbodenhorizont, durch regelmäßige Bodenbearbeitung geprägt, mit einem schwach verfestigtem Krümel- und Einzelkorngefüge, stark durchwurzelt, mit feinen Rissen bis 1mm, 1-2 Vol. % an Feinporen, belebte und unbelebte Wurzelröhren mit geringem Anteil, carbonatfrei
37-52 cm	Ah+Bv	Schmutzig, gelber, schwach humoser Unterbodenhorizont, mit leichten Verbraunungsmerkmalen, mit schwach verfestigtem Einzelkorn- bzw. Kittgefüge, ohne Risse und Poren, belebte Wurzelröhren mit geringem Anteil, carbonatfrei
52-65 cm	ilCv	Schmutzig grauer, humusfreier verwitterter Untergrundhorizont aus Lockersubstrat, schwach bis mittel verfestigtes Einzelkorn- bzw. Kittgefüge, ohne Risse und Poren, unbelebte Wurzelröhren mit geringem Anteil, carbonatfrei
65-105+ cm	Go	Schmutzig grauer humusfreier Untergrundhorizont mit Grundwassereinfluss, mit 30% Flächenanteil an oxidativen Merkmalen, dunkel- und hellrostfarben, mittel bis stark verfestigtes Kittgefüge, geringer Anteil an unbelebten Wurzelgängen, carbonatfrei

Abbildung 4-2: Bodenprofil am Standort Lärz

Der Standort Vermold zählt zu den Bodengroßlandschaften (BGL) der Niederungen und Urstromtäler der Altmoränenlandschaft (BGL5000). Die vorherrschenden Böden sind Braunerden, Podsole, Parabraunerden, Gleye und Moore sowie Fahlerden.

Für den Hanfanbau wurden am Standort Vermold zwei Flächen mit unterschiedlichen Bodenarten ausgewählt, um mögliche Einflüsse auf das Pflanzenwachstum verifizieren zu können. Dabei handelt es sich um einen lehmigen (schweren) Boden, der als Vermold 1 beschrieben wird, sowie um einen sandigen (leichten) Boden, Vermold 2.

Das Bodenprofil am Standort Vermold 1 zeigt einen Kolluvisol über Gley aus Lehm (Abbildung 4-3). Wie der Landwirt vor Ort berichtete, wurde vor ca. 50 Jahren lehmiges Aushubmaterial eines nahegelegenen Straßenbaus auf dem Feld aufgetragen, um die Bodenstruktur zu verbessern. Der Lehm Boden kann durch seinen höheren Anteil an Tonmineralen mehr Nährstoffe und Wasser binden als ein Sandboden. Durch die jahrelange Ackerbewirtschaftung und den damit verbundenen Eintrag von organischem Material durch Erntereste, hat sich der Humusanteil des Ausgangsmaterials erhöht. Dadurch erscheinen die oberen 30 cm dunkler, als das Lehmmaterial in der Tiefe von 30 bis 47 cm. Die Pfluggrenze bei 30 cm Bodentiefe zeigt eine Veränderung am Verfestigungsgrad des Bodengefüges. Durch das Wenden der Ackerkrume ist das Gefüge lockerer und weist eine Krümelstruktur auf. Der Steinanteil liegt bei beiden Oberbodenhorizonten bei 2 %. Ab ca. 47 cm findet ein Substratwechsel hin zu sandigerem Material statt, der mit Horizontbezeichnung mit einer römischen Zahl gekennzeichnet wird. Hier befindet sich der reliktsche Oberbodenhorizont, der die einstige Geländeoberfläche darstellt. Dies erklärt den höheren Humusgehalt und die geringere Lagerungsdichte als im darüber liegenden Horizont. Anschließend folgt von 66 bis 106 cm ein Verzahnungshorizont des ehemaligen Oberbodens mit dem darunterliegenden Grundwasserhorizont. Dieser weist neben dem reliktschen braunen, mittel humosen Oberboden auch deutliche, oxidative Merkmale auf. Ein sehr geringer Anteil davon ist braunschwarz und somit Mangan führend. Der reliktsche Ah-Horizont besitzt ein Krümelgefüge, der Grundwasserhorizont dagegen ein Kittgefüge. Von 106 bis 126 cm Bodentiefe schließt ein grundwasserbeeinflusster Übergangshorizont an, der zu ungefähr gleichen Anteilen oxidierende und reduzierende Merkmale aufweist. Das Kittgefüge ist mittel-verfestigt und der Steinanteil steigt auf 5 %. Es folgt ein grundwasserbeeinflusster Horizont mit einem Substratwechsel zu grobkörnigerem Sand. Dieser zeigt überwiegend reduzierende Verhältnisse, sichtbar an einer grau-orangen Färbung, welche durch den Gehalt an Eisen und Mangan hervorgerufen wird.

Dieser Horizont geht über die aufgegrabene Tiefe von 150 cm hinaus (Anhang 10). Mittels eines Pürckhauer-Einschlages in die Sohle des Bodenprofils wurde ein Grundwasserstand von 235 cm ermittelt (18.09.2013). Das gesamte Profil ist carbonatfrei. Die Ackerzahl dieser Fläche wird mit 32 Punkten angegeben.



## Normkolluvisol aus flach gekippten Schluffton über gekippten Normallehm über Normgley aus glazigenem Sandeilehm

Ykn/GGn;oj-ut(Yj)\oj-ll(Yj)/g-sl(Sg)



← 20 cm →

Tiefe	Horizontsymbol	Beschreibung
0-30 cm	jAp	Dunkelbrauner, mittel humoser Oberbodenhorizont, durch regelmäßige Bodenbearbeitung geprägt, mit einem schwach verfestigtem Krümel- und Subpolyedergefüge, mittel durchwurzelt, mit feinen Rissen bis 1mm, 1-2 Vol. % an Feinporen, belebte und unbelebte Wurzelröhren mit geringem Anteil, carbonatfrei, Steinanteil: 2%
30-47 cm	jAh-M	Gelb-brauner, schwach humoser Übergangshorizont zwischen Ah und aufgetragenem Mineralbodenhorizont, mittel verfestigtem Subpolyedergefüge, mittlerer Anteil an Rissen und Poren, belebte Wurzel- und Regenwurmröhren, carbonatfrei, Steinanteil: 2%
47-66 cm	IIrAh	Brauner, mittelhumoser reliktscher Oberbodenhorizont, schwach verfestigtes Subpolyedergefüge, sehr feine Risse, mittlerer Porenanteil, Wurzel- und Regenwurmröhren, carbonatfrei, Steinanteil: 1%
66-106 cm	IIrAh+Go	brauner mittel humoser reliktscher Oberbodenhorizont verzahnt mit ocker- bis schmutzig-weißem Horizont mit Stauwassereinfluss, stauwasserleitend, mit sehr hohem Flächenanteil an oxidativen Merkmalen (hellrost-u. ockerfarben), davon sehr geringer Anteil braunschwarz (Mangan führend), Ah: Krümelgefüge, Go: Kittgefüge, geringer Anteil an unbelebten Wurzelgängen, carbonatfrei, Steinanteil: 1%
106-126 cm	II Gr-Go	Ocker-gelber bis rostroter grundwasserbeeinflusster Übergangshorizont mit ungefähr gleichen Anteilen an reduzierenden und oxidierenden Verhältnissen, mittel verfestigtes Kittgefüge, sehr feine Risse, mittlerer Porenanteil, unbelebte Wurzelgänge, carbonatfrei, Steinanteil: 5%
126-150+ cm	III Go-Gr	Grau-oranger grundwasserbeeinflusster Horizont mit überwiegend reduzierenden Verhältnissen, mittel verfestigtes Kitt bzw. Einzelkorngefüge, sehr feine Risse, mittlerer Porenanteil, unbelebte Wurzelgänge, carbonatfrei, Steinanteil: 1%

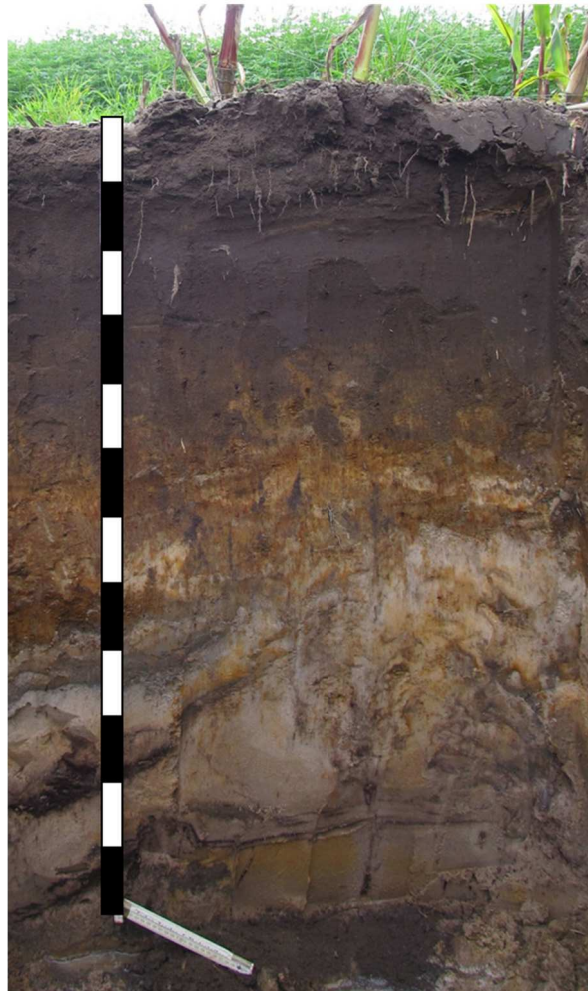
Abbildung 4-3: Bodenprofil am Standort Vermold 1

Ein weiteres Bodenprofil wurde am Standort Vermold 2 aufgenommen, welches als Plaggenesch-Gley aus Lehmsand angesprochen wurde (Abbildung 4-4). Der dominierende Bodentyp ist der Gley; die Mächtigkeit des E-Horizontes, der für den Plaggenesch charakteristisch ist, ist durch Aufgabe der Plaggenkultur und die anschließende ackerbauliche Nutzung, zurückgegangen. Die Plaggenwirtschaft wurde in der Münsterländischen Bucht seit dem Mittelalter bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts praktiziert, um die nährstoffarmen Sandböden aufzuwerten. Dabei wurden Plaggen aus der Heide oder von Grasflächen entnommen, als Stalleinstreu genutzt und anschließend mit dem Stallung (und Küchenabfällen) wieder auf die Flächen ausgebracht. Dies erhöhte den Anteil an organischer Substanz im Oberboden, wodurch eine Verbesserung der Nährstoff- und Wasseraufnahme erreicht wurde. Für eine Ansprache als Plaggenesch-Gley müssen die Ah/E- und E-Go-Horizonte mehr als 4 Dezimeter betragen, die an diesem Standort bis 50 cm Bodentiefe reichen. Charakteristisch für einen Eschhorizont, der einen erhöhten Gehalt an organischer Substanz besitzt, ist, dass er mächtiger als die Pflugtiefe ist, die sich bei 35 cm befindet. Die Bodenart dieser beiden Horizonte wurde mittels Fingerprobe als schwach lehmiger Sand bestimmt. Von 50 bis 70 cm Bodentiefe schließt sich ein ocker-rostfarbener Grundwasserhorizont mit vorwiegend oxidierenden Verhältnissen an. Im anschließenden Übergangshorizont von 70 bis 94 cm, mit ungefähr gleichen Anteilen von oxidierenden und reduzierenden Bedingungen, findet ein Substratwechsel zu schwach tonigem Sand statt, dessen Korngröße gegenüber den darüber liegenden Horizonten deutlich gröber ist. Dieser Sand besteht aus Ablagerungen der Saale-Eiszeit, die während des Weichsel-Glazials überprägt wurden. Die Strukturen dieses Horizontes könnten aufgrund von Kryoturbation entstanden sein. Diese findet häufig in Periglazialgebieten statt. Durch das Auftauen des Oberbodens kann das Wasser dieser Auftauschicht nicht in den gefrorenen Untergrund versickern, wodurch eine hohe Wassersättigung entsteht. Das Wiedergefrieren erfolgt von oben nach unten, wobei ein Auflastdruck auf den Permafrost im Untergrund gebildet wird. Das schlammige Oberbodenmaterial gleitet auf der gefrorenen Unterschicht entlang. Die mehrfache Wiederholung dieses Prozesses kann zu einer Durchmischung der gesamten Auftauschicht führen. Da die Auftautiefe im Periglazialgebiet 50 bis 70 cm betrug, ist die Kryoturbation bis in diese Tiefe anzutreffen. Durch den Auftrag von organischem Material bei der Plaggenwirtschaft, hat die Geländeoberfläche künstlich erhöht, kann an diesem Standort auch in einer Tiefe von 70 bis 90 cm mit dem Phänomen der Kryoturbation gerechnet werden.

Ab 94 cm folgt ein Grundwasserhorizont, der im Jahresverlauf fast durchgängig reduzierende Verhältnisse aufweist und dadurch grün- bis blaugrau gefärbt ist. Das Einzelkorngefüge ist schwach verfestigt. In allen Horizonten konnte kein Carbonat nachgewiesen werden (Anhang 11). Das Bodenprofil wurde bis zu einer Tiefe von 125 cm ausgehoben, wobei sich am Boden bereits Grundwasser sammelte.

## Plaggenesch-Gley aus organogenem Lehmsand über flachem organogenem Schluffsand über glazigenem Lehmsand

YE-GG: og-ls(Yj)/og-us(Yj)\g-ls(Sg)



Tiefe	Horizontsymbol	Beschreibung
0-35 cm	Ap/E	Graubrauner, mittel humoser Oberbodenhorizont, durch regelmäßige Bodenbearbeitung geprägt, mit einem sehr schwach verfestigtem Krümelgefüge, schwach feucht, stark durchwurzelt, mit feinen Rissen bis 2 mm, 1-2 Vol. % an Feinporen, belebte und unbelebte Wurzel- und Regenwurmröhren mit geringem Anteil, carbonatfrei, Steinanteil: <1%
35-50 cm	E-Go	Gelb-brauner, schwach humoser Grundwasserhorizont mit oxidierenden Verhältnissen (hellrostfarben), mit Ah-Material in Form von Flecken, mit schwach verfestigtem Krümel- bzw. Einzelkorngefüge, Risse bis 2mm, Poren bis 5% Flächenanteil, belebte Wurzel- und Regenwurmröhren mit geringem Anteil, carbonatfrei
50-70 cm	Go	Ocker-rostfarben bis schmutzig weißer Grundwasserhorizont mit überwiegend oxidierenden Verhältnissen, schwach verfestigtes Einzelkorn- bzw. Kittgefüge, sehr feine Risse, keine Poren, unbelebte Wurzelröhren mit Organik verfüllt, carbonatfrei
70-94 cm	IIGo-Gr	Schmutzig weiß-grauer Grundwasserhorizont mit überwiegend reduzierenden Bedingungen, hellrostfarben sowie gebleicht und grüngrau bis blaugrau, schwach verfestigtes Einzelkorngefüge, geringer Anteil an unbelebten Wurzelröhren, carbonatfrei,
94-125+ cm	IIGr	Grau-gelber Grundwasserhorizont mit im Jahresverlauf fast durchgängigen reduzierenden Verhältnissen, gebleicht, grüngrau bis blaugrau, schwach verfestigtes Einzelkorngefüge, geringer Anteil an unbelebten Wurzelröhren, carbonatfrei

Abbildung 4-4: Bodenprofil am Standort Vermold 2

In Tabelle 4-1 sind die Bodenkennwerte als auch die Hauptnährstoffgehalte (Stickstoff, Phosphor und Kalium) der drei Versuchsflächen horizontweise zusammengefasst. Die einzelnen Standorte zeigen deutliche Unterschiede in Bezug auf die Hauptnährstoffvorräte auf, die durch die Bodenart, sowie die Bewirtschaftungsform bedingt sind. Zudem hat die Höhe und Art des verwendeten Düngers Einfluss auf den Gesamtnährstoffgehalt.

Der anthropogene Lehmauftrag bis zu einer Tiefe von 66 cm am Standort Vermold 1 führt durch den höheren Tongehalt der Bodenart (Lt2: 25-35 % Ton, Ls3 und Ls4: 17-25 % Ton) zu einem höheren Gehalt an Tonmineralen gegenüber sandigen Böden. Daraus resultiert eine stärkere Nährstoffhaltekapazität und Wasserhaltekapazität, so dass weitere Parameter, wie z.B. pH-Wert, Leitfähigkeit und  $C_{org}$ -Gehalt ebenfalls davon beeinflusst werden. Diese nehmen höhere Werte am Standort Vermold 1 ein als auf den sandigen Standorten Vermold 2 und Lärz. Die Trockenrohdichte ist auf dem lehmigen Standort in den oberen 30 cm Bodentiefe erhöht, welches unter Umständen die landwirtschaftliche Bearbeitung dieser Fläche erschweren und sich nachteilig auf das Wurzelwachstum und den Bodenlufthaushalt auswirken kann. In den darunterliegenden Horizonten schließen sich Sandlehme als Bodenarten-Gruppe an.

Die beiden sandigen Standorte Vermold 2 und Lärz weisen Bodenarten aus den Bodenarten-Gruppen Lehmsande und Schluffsande auf, die einen maximalen Tongehalt von 17 % besitzen. Die  $C_{org}$ -Gehalte sind am Standort Vermold 1 bis zu einer Tiefe von 66 cm und am Standort Vermold 2 bis zu einer Tiefe von 50 cm aufgrund der Plaggenwirtschaft gegenüber den anderen Horizonten und dem Standort Lärz deutlich erhöht.

Die pH-Werte lagen auf allen Versuchsflächen zwischen 5 und 7 (Tabelle 4-1) auf und befinden sich damit im optimalen Bereich für das Hanfwachstum. Am Standort Vermold 1 wurden im gesamten Bodenprofil höhere Gehalte an Magnesium und Calcium bestimmt (Anhang 12). Deren Carbonate, die sich an Tonminerale anlagern können, haben die Fähigkeit, den Säureeintrag über das Sickerwasser abzuf puffern. Daher konnten am Standort Vermold 1 die höchsten pH-Werte bestimmt werden. Am Standort Lärz lag die letzte Ausgleichskalkung kürzer zurück, wodurch die pH-Werte etwas höher waren als auf dem ebenfalls sandigen Standort Vermold 2.

Die elektrische Leitfähigkeit ist abhängig von der in der Bodenlösung vorhandenen Ionen (insbesondere Natrium und Chlorid) und sinkt auf allen Standorten mit zunehmender Bodentiefe ab. Am Standort Vermold 1 ist die Leitfähigkeit in den oberen drei Bodenhorizonten gegenüber den sandigen Horizonten höher, bedingt durch den höheren Tongehalt. Die Werte der Leitfähigkeit fallen auf allen Standorten in allen Bodenhorizonten sehr niedrig aus und liegen in der niedrigsten Güteklasse für den Salzgehalt (0-250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Ebenfalls durch den höheren Tongehalt am Standort Vermold 1 bedingt, finden sich an diesem Standort deutlich höhere Eisen- und Aluminiumgehalte gegenüber den beiden sandigen Standorten Vermold 2 und Lärz (Anhang 12).



**Tabelle 4-1: Bodenkennwerte der Versuchsflächen**

<i>Standort</i>	<i>Horizont.</i>	<i>Bodentiefe [cm]</i>	<i>Boden- art</i>	<i>TRD [g/cm<sup>3</sup>]</i>	<i>pH- Wert</i>	<i>Lf [μS/cm]</i>	<i>C<sub>org</sub> [%]</i>	<i>N<sub>t</sub> [%]</i>	<i>C<sub>org</sub>/N<sub>t</sub>- Verhältnis</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>
										<i>[mg/100 g Boden]</i>		
Lärz	Ap	0-37	St2	1,32	5,9	24,15	1,28	0,11	12,0	107,00	61,9	65,3
	Ah + Bv	37-52	Sl2	1,50	6,7	14,75	0,30	0,02	12,5	24,00	19,2	100,1
	ilCv	52-65	Sl2	1,47	6,9	10,70	0,11	0,01	13,3	8,00	13,3	94,8
	Go	65-105+	Sl2	1,50	7,2	11,20	0,05	0,00	12,5	4,00	9,4	76,9
Versmold 1	jAp	0-30	Lt2	1,52	7,0	105,95	1,51	0,14	11,1	136,00	56,1	349,3
	jAh-M	30-47	Ls3	1,61	7,2	103,15	1,16	0,10	11,7	99,00	60,4	313,4
	II rAh	47-66	Ls4	1,49	6,9	63,75	1,19	0,10	11,6	102,00	70,7	230,1
	II rAh + Go	66-106	Slu	1,55	6,7	49,75	0,63	0,04	15,4	41,00	13,8	175,5
	II Gr-Go	106-126	St3	1,73	6,5	37,60	0,18	0,02	9,9	18,00	12,1	331,6
	III Go-Gr	126-150+	St3	1,69	6,2	38,60	0,12	0,02	7,7	15,00	10,3	304,0
Versmold 2	Ap/E	0-35	Sl2	1,37	5,6	34,75	1,28	0,11	11,4	113,00	94,9	73,4
	E-Go	35-50	Sl2	1,56	5,7	33,05	0,58	0,05	12,1	48,00	42,6	82,2
	Go	50-70	Su3	1,70	5,6	24,90	0,19	0,02	10,6	18,00	15,4	68,2
	II Go-Gr	70-94	St2	1,66	5,7	19,70	0,14	0,02	9,2	15,00	9,5	75,7
	II Gr	94-125+	St2	1,71	5,9	10,95	0,12	0,01	15,3	8,00	2,5	58,9

Die Stickstoffgehalte sind zum einen als Gesamtstickstoff in Prozent angegeben, zur Vergleichbarkeit mit dem  $C_{org}$ -Gehalt, sowie als Gesamtstickstoffgehalt in Milligramm pro 100 Gramm Boden, um diesen mit den anderen Hauptnährstoffen vergleichen zu können. Die Stickstoffgehalte im Pflughorizont sind auf allen drei Standorten ähnlich und nehmen mit zunehmender Bodentiefe ab. Nur am Standort Vermold 1 liegen die Stickstoffgehalte noch in den beiden darauffolgenden Horizonten (ehemalige Ah-Horizonte) um die 100 mg/100 g Boden. Das C/N-Verhältnis befindet sich auf allen Standorten im Oberboden zwischen 11,1 und 12,0. Dieses Verhältnis wird als eng bewertet und beschreibt eine gute Zersetzbarkeit der Streu, die durch Mikroorganismen umso rascher abgebaut wird, je stickstoffreicher sie ist.

Die Phosphorgehalte nehmen auf den sandigen Standorten Lärz und Vermold 2 mit zunehmender Bodentiefe ab. Am lehmigen Standort Vermold 1 steigen sie dagegen bis zu einer Tiefe von 1 m an. Hier befindet sich der reliktsche Ah-Horizont, der durch den Bodenauftrag überdeckt wurde. Gegenüber dem Standort Lärz weisen die Standorte Vermold 1 und 2 höhere Phosphorgehalte im Oberboden auf. Diese entstammen der ehemaligen Plaggennutzung, bei der sehr phosphorhaltiges Material, wie Kompost und Mist, aufgetragen wurde.

## 4.2 Lysimeterstation Falkenberg

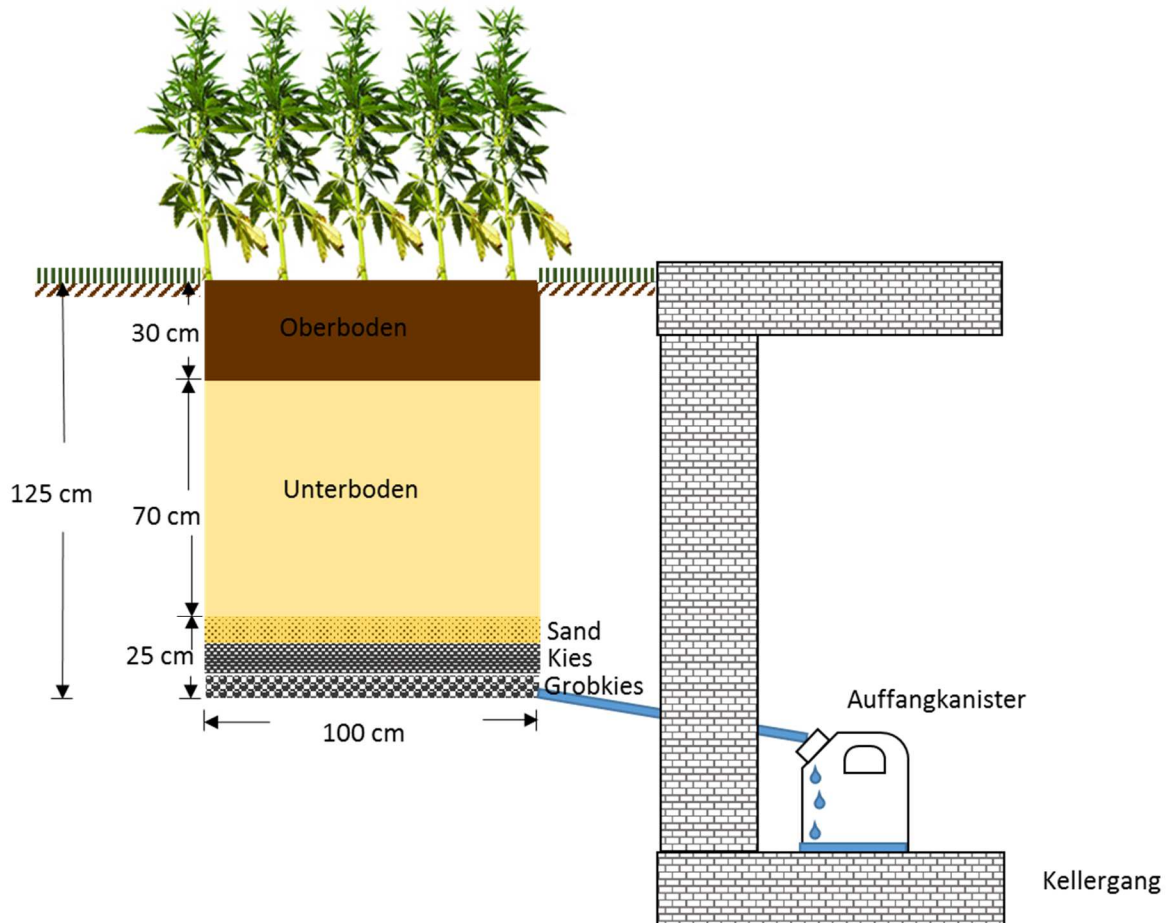
Die Lysimeterstation Falkenberg wurde 1981 in der Altmark Sachsen-Anhalts, nahe der Hansestadt Seehausen gegründet. Auf 120 frei-dränenden Kastenlysimetern wird die Wasserbilanz, sowie der Nährstoffhaushalt analysiert. Die Lysimeter haben eine Grundfläche von 1 x 1 Meter und sind 1,25 Meter tief (Godlinski 2005).

Das Bodenmaterial wurde an repräsentativen Standorten der neuen Bundesländer entnommen und besteht überwiegend aus sandigem Lehm. Davon untergliedert sich der obere Meter in 30 cm Oberbodenmaterial und 70 cm Unterbodenmaterial, welches horizontweise in 10 cm Schritten befüllt wurde. Anschließend wurde es manuell auf die natürlichen Lagerungsverhältnisse rückverdichtet (Godlinski 2005) (Tabelle 4-2). Die  $C_{org}$ -Gehalte der Lysimeter sind niedriger als auf den landwirtschaftlichen Versuchsflächen, da hier mineralischer Dünger aufgebracht wurde statt organischem Dünger. Dadurch ergibt sich auch ein engeres  $C_{org}/N_t$ -Verhältnis. Ebenfalls weist der  $P_t$ -Gehalt des Oberbodens geringere Werte als auf den Praxisflächen auf (Tabelle 4-1).

**Tabelle 4-2: Bodenkennwerte der verwendeten Lysimeter (verändert nach Godlinski 2005)**

<i>Standort</i>	<i>Bodentiefe</i>	<i>Bodenart</i>	<i>TRD</i>	<i>pH-Wert</i>	<i>C<sub>org</sub></i>	<i>N<sub>t</sub></i>	<i>C<sub>org</sub>/N<sub>t</sub></i>	<i>P<sub>t</sub></i>
	[cm]		[g/cm <sup>3</sup> ]		[%]	[%]	[%]	[mg/100g Boden]
Falkenberg	0-30	S14	1,48	5,8	0,95	0,17	7,3	48,5
Falkenberg	30-100	S12	1,84	5,6	0,13	0,14	4,3	n.b.

Nach 100 cm Bodentiefe folgt eine 25 cm-stärke Filterschicht aus Sand, Kies und Grobkies, an die ein Dränrohr angeschlossen ist, über welches das Sickerwasser gravimetrisch in einen Auffangbehälter im angrenzenden Kellergang abfließen kann (Abbildung 4-5). Die Kanister werden monatlich entleert und die Sickerwassermenge volumetrisch bestimmt.



**Abbildung 4-5: Aufbau der Lysimeter in Falkenberg, verändert nach Godlinski (2005)**

Das Sickerwasser wird anschließend im Labor auf folgende Parameter analysiert: pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Anionen und Kationen, sowie Gesamt-Phosphor. Die notwendigen meteorologischen Parameter werden von einer hauseigenen Wetterstation aufgezeichnet.

Für die Versuchsdurchführung standen vier Lysimeter zur Verfügung. Diese wurden gleich den Feldversuchen mit der Sorte Fedora 17 bestellt. Als Aussaatstärke wurden 25 kg Saatgut pro Hektar ausgewählt, welches für die ein Quadratmeter große Lysimeterfläche 25 g Saatgut (ca. 130 Körner) bedeutete. Es wurden 6 Reihen mit einem Abstand von 14 cm angelegt, in die alle 4 cm ein Samenkorn gesät wurde. Die Düngegaben für den Hanf im Winter- bzw. Sommeranbau sind an die Düngemengen der landwirtschaftlichen Versuchsflächen angelehnt. Im Herbst ist die Düngergabe auf 80 kg Stickstoff/ha aufgrund einer möglichen Auswaschungsgefahr ins Grundwasser beschränkt. Im Sommeranbau ist eine Gabe von 120 kg Stickstoff/ha ausreichend. Die Höhe der Phosphor- und Kaliumgabe wurde über den durchschnittlichen Gehalt einer Rindergülle berechnet, um das Nährstoffverhältnis zum Stickstoff

vergleichbar mit der Felddüngung zu halten (Anhang 13). Die Düngung erfolgte auf den Lysimetern in Form von Mineraldünger (N-Kalkammonsalpeter, K- Kornkali und P in Thomasposphat). Die Belegung und Düngung der Lysimeter ist in Tabelle 4-3 zusammengefasst. Dabei muss beachtet werden, dass die Lysimeter 116 und 117 nach dem Sommeranbau des Hanfes 2014 bis Anfang März des Folgejahres brach lagen. Ende Februar erfolgte eine Grunddüngung mit 20 kg Phosphor /ha und 150 kg Kalium/ha. Am 09.03.15 wurde Sommergerste auf diesen beiden Lysimetern ausgesät. In den Anbaujahren 2013/14 und 2014 wurden die Pflanzenhöhen und Stängeldurchmesser bonitiert.

**Tabelle 4-3: Ausgebrachte Düngemengen auf den mit Hanf bestellten Lysimetern**

<i>Lysimeter-Nr.</i>	<i>Vorfrucht</i>	<i>Düngung Hanf Winteranbau 2013/14</i>	<i>Düngung Hanf Sommeranbau 2014</i>	<i>Düngung Hanf Winteranbau 2014/15</i>
<b>29</b>	Winterroggen	Keine Düngung	80 kg N/ha, 13 kg P/ha, 91 kg K/ha	80 kg N/ha, 13 kg P/ha, 91 kg K/ha
<b>30</b>	Winterroggen	Keine Düngung	80 kg N/ha, 13 kg P/ha, 91 kg K/ha	80 kg N/ha, 13 kg P/ha, 91 kg K/ha
<b>116</b>	Winterroggen	80 kg N/ha, 13 kg P/ha, 91 kg K/ha	120 kg N/ha, 19,5 kg P/ha, 136,5 kg K/ha	Brache (Ende Feb 15 :20 kg P/ha 150 kg K/ha
<b>117</b>	Winterroggen	80 kg N/ha, 13 kg P/ha, 91 kg K/ha,	120 kg N/ha, 19,5 kg P/ha, 136,5 kg K/ha	Brache (Ende Feb 15 :20 kg P/ha 150 kg K/ha



## 5 Material und Methoden

### 5.1 Bodenanalytik

Für die Bohrstockkartierung wurde ein Beprobungsschema entworfen, welches auf den Versuchsflächen angewendet wurde (Abbildung 5-1). In einem 4 x 5 Raster wurden 20 Beprobungspunkte festgelegt, die jeweils 3 Meter voneinander entfernt lagen. Mit einem Abstand von 1,5 Metern zur Kernfläche, wurden die Eckpunkte der Beprobungsfläche mit langen Bambusstäben markiert, die bis zum Ende der Messkampagne auf dem Acker verblieben.

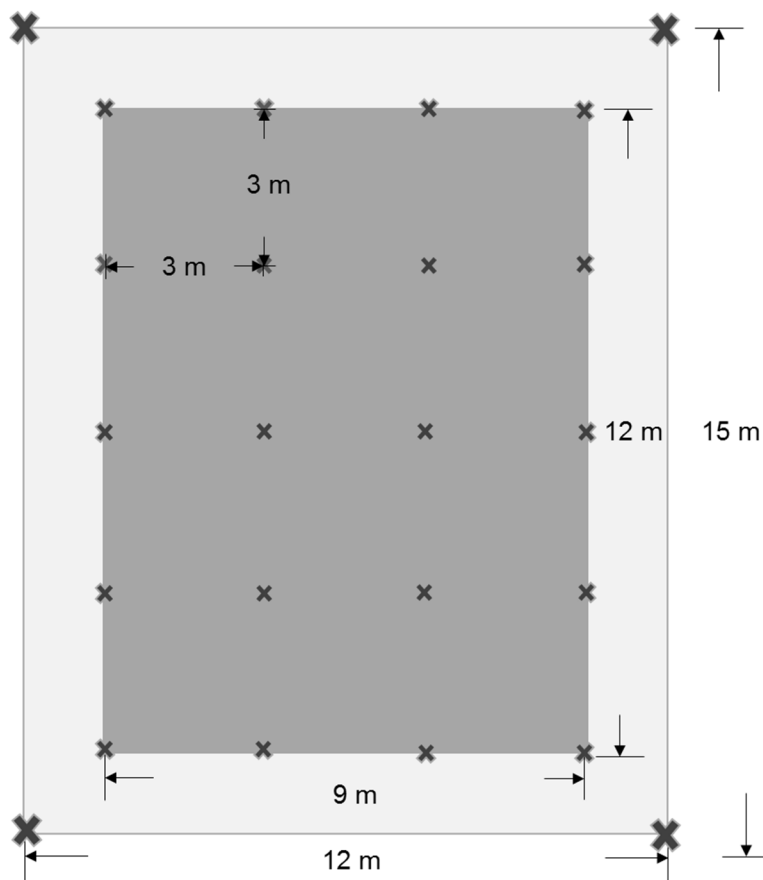


Abbildung 5-1: Beprobungsschema der Bohrstockkartierung

In Tabelle 5-1 sind die fünf Beprobungstermine aufgeführt, die während des Winteranbaus 2013/14 durchgeführt wurden. Die Beprobungstermine wurden zu wichtigen Entwicklungsstadien der Vegetation gewählt, um den Nährstoffentzug durch die Pflanzen, sowie die verfügbaren Nährstoffe im Boden erfassen zu können. Zur Vergleichbarkeit der Standorte wurden die Termine zeitnah gelegt, wobei es aufgrund der landwirtschaftlichen Abläufe in den Betrieben teilweise zu einer geringen Verschiebung dieser Termine kam.

Während die Versuchsflächen mit der Aussaatstärke von 25 kg/ha zu allen Terminen beprobt wurden, erfolgte die Beprobung der Flächen mit der Aussaatstärke von 50 kg/ha zur Reduzierung des Analyseumfanges nur an drei Terminen (Probennahmen 1,3,5).

**Tabelle 5-1: Beprobungstermine im Winteranbau 2013/14**

<i>Proben- nahmen [PN]</i>	<i>Datum</i>	<i>Standort</i>	<i>Zeitpunkt</i>	<i>Art der Beprobung</i>
1	23.-24.07.13 06.-07.08.13	Lärz Vermold	zur Aussaat	- Bodenbeprobung mittels Bohrstock
2	17.-19.09.13 24.-25.09.13	Vermold Lärz	Ende der Blüte, Beginn Samenbildung	- Bodenbeprobung (Aussaatstärke: 25 kg/ha) mittels Bohrstock - Profilaufnahme - Pflanzenbeprobung
3	04.-06.11.13	Lärz Vermold	Ende des Pflanzen- wachstums, beginnendes Absterben der Pflanzen	- Bodenbeprobung (Aussaatstärke: 25 kg/ha + 50 kg/ha) mittels Bohr- stock - Pflanzenbeprobung
4	14.-16.01.14	Lärz Vermold	nach dem ersten Frost	- Bodenbeprobung (Aussaatstärke: 25 kg/ha) mittels Bohrstock - Pflanzenbeprobung
5	04.-05.02.14 05.-06.03.14	Lärz Vermold	kurz vor der Ernte	- Bodenbeprobung (Aussaatstärke: 25 kg/ha + 50 kg/ha) mittels Bohr- stock - Quadratmeterschnitte des Ernteguts

Im Sommeranbau 2014 gab es zwei Bodenbeprobungen (Tabelle 5-2), wobei ein Termin zur Aussaat gelegt wurde, um die Nährstoffausgangsgelhalte im Boden zu erfassen. Ein weiterer wurde kurz vor die Ernte terminiert.

**Tabelle 5-2: Beprobungstermine im Sommeranbau 2014**

<i>Proben- nahmen [PN]</i>	<i>Datum</i>	<i>Standort</i>	<i>Zeitpunkt</i>	<i>Art der Beprobung</i>
6	15.-16.04.14	Lärz Vermold	Zur Aussaat	- Bodenbeprobung mittels Bohrstock
7	27.-28.08.14	Lärz Vermold	Ende des Längen- wachstums	- Bodenbeprobung mittels Bohrstock - Quadratmeterschnitte des Ernteguts in 5-facher Wdh.

Die Bodenproben wurden mit Hilfe eines Pürckhauer-Bohrstockes gewonnen und in folgende Bodentiefenabschnitte unterteilt: 0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm. Die 20 Einzelproben jeder Bodentiefe wurden für die nachfolgende Analytik zu einer Mischprobe vereinigt. Im Labor wurden die gewonnenen Bodenproben homogenisiert und auf 2 mm gesiebt, um die Grobbo-denanteile zu entfernen. Eine Teilprobe wurde zur weiteren Analytik feldfrisch eingefroren, eine weitere Teilprobe luftgetrocknet und mit einer Achatkugelmühle pulverisiert.

In Tabelle 5-3 sind die Untersuchungsparameter mit der jeweiligen Messmethode aufgeführt.

**Tabelle 5-3: Untersuchungsparameter und Messmethoden der Bodenproben**

<i>Untersuchungsparameter</i>	<i>Messmethode</i>
Wassergehalt, Trockensubstanz	Trocknung 105°C (VDLUFA A2.1.1)
pH-Wert	pH-Elektrode (VDLUFA A5.1.1)
Elektrische Leitfähigkeit	Leitfähigkeitselektrode (VDLUFA A10.1.1)
P, K (Boden)	Modifizierter Mikrowellenaufschluss nach EPA 3052
C-Gesamt und C <sub>org</sub>	Elementaranalyse
N <sub>min</sub> (NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> )	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -Extraktion (VDLUFA A6.1.1)
Pflanzenverfügbare Nährstoffe: P, K	Doppellactat-Extraktion (VDLUFA A6.2.1.2)
Kaltwasserlöslicher C und N	Kaltwasserextraktion nach Ghani <i>et al.</i> (2003)
Wasserlösliche Nährstoffe: P, K	Kaltwasserextraktion nach Ghani <i>et al.</i> (2003)
Leicht verfügbarer C und N	Heißwasserextraktion nach Ghani <i>et al.</i> (2003)

Aus den Messlösungen der verschiedenen Extraktionen wurden anschließend die Gehalte an Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium am ICP-OES (inductively coupled plasma optical emission spectrometry, Ultima 2, Horiba, Japan) bestimmt. Der kalt- und heißwasserlösliche Kohlenstoff und Stickstoff wurden am TOC/TN-Gerät der Firma Analytik Jena (Deutschland) gemessen. Der Anteil an mineralisierbaren Stickstoff (N<sub>min</sub>) wurden am Continuous-Flow-Gerät (CFA) der Firma Skalar (Breda, Niederlande) ermittelt.

Die Aufnahme der Gesamtnährstoffgehalte erfolgte einmalig an den Bodenproben, die horizontweise aus den Bodenprofilen entnommen wurden. Die Gesamtgehalte an Kohlenstoff und Stickstoff wurden über die Elementaranalyse (C/N vario EL, elementar, Langensfeld, Deutschland) bestimmt. Alle weiteren Nährstoffe wurden mittels Mikrowellenaufschluss (angelehnt an die EPA-Methode 3052) mit verdünnter Salpetersäure extrahiert und am ICP-OES analysiert.

## **5.2 Pflanzenbonituren und -analyse**

### **5.2.1 Winteranbau 2013/14**

Im Winteranbau 2013/14 wurde der Hanf in zwei Aussaatstärken ausgedrillt. Zum einen mit einer Saatstärke von 25 kg Saatgut/ha, zum anderen mit 50 kg Saatgut/ha. Das entspricht einer ungefähren Pflanzenzahl von 130 bzw. 260 Pflanzen pro Quadratmeter. Nach dem Auflaufen wurden von den Landwirten vor Ort in zweiwöchigen Abständen bis Mitte September die Pflanzhöhen und die Stängeldurchmesser (in 50 cm Höhe) in fünffacher Wiederholung gemessen.

Des Weiteren wurden über die Anbauzeit von Juli bis Februar bzw. März verteilt, vier Bonituren und Pflanzenbeprobungen zu folgenden Zeitpunkten durchgeführt:

- Ende der Blüte, Beginn der Samenreife = Ende der Hauptwachstumsphase
- Absterben der Pflanzen = Ende des Pflanzenwachstums
- Nach dem ersten Frost
- Kurz vor der Ernte

An diesen Terminen wurde die Pflanzenzahl pro Quadratmeter in dreifacher Wiederholung ausgezählt, sowie die Pflanzen eines halben Quadratmeters für die weitere Analytik entnommen. An den Pflanzen wurden die Länge (oberirdischer und unterirdischer Spross) und der Stängeldurchmesser (in 50 cm Höhe) gemessen. Danach wurden sie in Blüte, Blatt, Stängel und Wurzel unterteilt. Die verschiedenen Pflanzenteile des halben Quadratmeters wurden jeweils zu einer Mischprobe vereinigt, getrocknet und gewogen. Für die weitere Analytik wurden die Pflanzenteile zunächst mit einer Schneidmühle (Retsch, SM 100, Haan, Deutschland) vorzerkleinert und anschließend mit einer Planeten-Kugelmühle (Retsch SM 200, Haan, Deutschland) in Achatbechern pulverisiert. Die Messmethoden zur Bestimmung der Hauptnährstoffgehalte sind in Tabelle 5-4 verzeichnet.

**Tabelle 5-4: Untersuchungsparameter und Messmethoden der Pflanzenproben**

<i>Untersuchungsparameter</i>	<i>Messmethode</i>
Wassergehalt, Trockensubstanz	Trocknung 105°C (VDLUFA A2.1.1)
Stickstoff	Elementaranalyse
Nährstoffgehalte: P, K	Modifizierter Mikrowellenaufschluss nach EPA 3052

### 5.2.2 Sommeranbau 2014

Im Sommeranbau 2014 wurde der Hanf in nur einer Aussaatstärke von 25 kg Saatgut/ha (ca. 130 Körner/m<sup>2</sup>) auf den sandigen Ackerflächen der Standorte Lärz und Vermold ausgesät. Am Standort Vermold wurde, wie auch im Winteranbau, die Sorte Fedora 17 ausgedrillt. Da es leider im Sommer 2014 zu einem Lieferengpass bei dieser Sorte kam und für die Flächen in Lärz kein Saatgut mehr bestellt werden konnte, musste hier auf die Sorte Futura 75 ausgewichen werden, die der Sorte Fedora 17 in ihren Wachstumseigenschaften am nächsten kommen soll.

Aus Zeit- und Kostengründen konnte nur eine Pflanzenbeprobung zum Zeitpunkt der Blüte durchgeführt werden. Dabei wurden Quadratmeterernten in fünffacher Wiederholung entnommen, vermessen und aufgearbeitet.

### 5.3 Faseranalytik

Die Analytik der Hanffasern wurde von der Hochschule Bremen, Fachrichtung Bionik, in der Arbeitsgruppe Biologische Werkstoffe durchgeführt. Die Handerntten wurden zuerst mit einem Laborbrecher (Worthmann Maschinenbau GmbH, Barbel-Harkebrügge, Deutschland) mit drei Durchgängen aufgeschlossen, um die Bastfasern vom Holzteil zu trennen. Anschließend folgte eine Bearbeitung mit einem Grobauflöser (Worthmann Maschinenbau GmbH, Barbel-Harkebrügge, Deutschland), um die Faserbündel zu verfeinern. Die Schäben wurden manuell von den Fasern nach einer 24-stündigen Klimatisierung im Normalklima (20°C, 65 % rel. Luftfeuchte) getrennt. Über das Gewicht der gesäuberten Faserbündel kann der Faseranteil in Bezug auf die Ausgangsstängelmasse berechnet werden. Die Faserqualität wurde daraufhin über die Parameter Faserbreite und die Messergebnisse der Faserzugversuche charakterisiert. Die Fasern wurden auf eine Länge von ungefähr 5 mm zugeschnitten und mit Hilfe eines Scanners (Epson Perfection Foto V700, Epson, Meerbusch, Deutschland) eingescannt und vermessen (Graupner 2014). Im Rahmen der Arbeit wurden Zugfestigkeit, Zugmodul und Bruchdehnung als Faserzugeigenschaften bestimmt. Dazu wurden ca. 80 einzelne Faserbündel mit der Zugprüfmaschine Fafegraph M (Textechno, Mönchengladbach, Deutschland) mit einer 1000 cN Kraftmessdose (in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 5079) geprüft. Für den Messvorgang wurden die Faserbündel über einen Einspannlänge von 20 mm mit PVC beschichteten Klemmen pneumatisch fixiert und mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min gemessen. Die daraus resultierenden Spannungs-Dehnungs-Kurven wurden am Computer aufgezeichnet. Bastfasern zeigen dabei ein nahezu lineares Verhalten vom Start der Zugprüfung bis zum Bruch der Fasern (Graupner 2014). Die Querschnittsflächen der Faserbündel wurden nach dem Zugversuch über den Scanner (s.o.) vermessen, um die Zugfestigkeit und den Zugmodul auswerten zu können. Aus den ermittelten Daten können abschließend die Parameter Zugfestigkeit, Zugmodul und Bruchdehnung berechnet werden.

### 5.4 Mikroskopie

#### 5.4.1 Environmental Scanning Electron Microscopy (ESEM)

Die ESEM (Environmental Scanning Electron Microscopy)-Methode stellt eine spezielle Form der Rasterelektronenmikroskopie dar, bei der auch nicht vakuumstabile oder ausgasende Proben gemessen werden können.

Die mikroskopischen Aufnahmen der Hanfstängel wurden am Fachgebiet Sicherheitstechnik/Umweltschutz der Bergischen Universität Wuppertal durchgeführt. Zur Probenvorbereitung wurden die geernteten Stängelabschnitte über Nacht in Wasser aufgeweicht, da es an den gerösteten, trockenen Hanfstängel nicht möglich war, dünne Querschnitte zu erzeugen. Anschließend wurden die Stängelquerschnitte auf spezielle Probenteller geklebt und am ESEM (Quanta 450 FEG, FEI, Oregon, USA) untersucht.

## 5.4.2 Durchlichtmikroskopie

Die lichtmikroskopischen Nahaufnahmen wurden an der Universität Bochum, Lehrstuhl für Evolution und Biodiversität der Pflanzen, mit einem Durchlichtmikroskop mit Leuchtfeldblende (DM LB Leica, Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Deutschland) angefertigt. Dieses verfügt über ein digitales Aufnahmesystem (Leica Application Suite V3.3.0). Für die Methode müssen die Proben frisch oder rehydriert vorliegen. Dazu wurden die gerösteten, trockenen Hanfstängel in einem Natriumdioctylsulfosuccinat-/Aceton-Gemisch für mindestens 24 Stunden eingelegt und für die Fluoreszenz-Aufnahmen mit Rhodamin-6G eingefärbt, um die enthaltenden Pektine zu visualisieren.

## 5.5 Statistische Auswertung

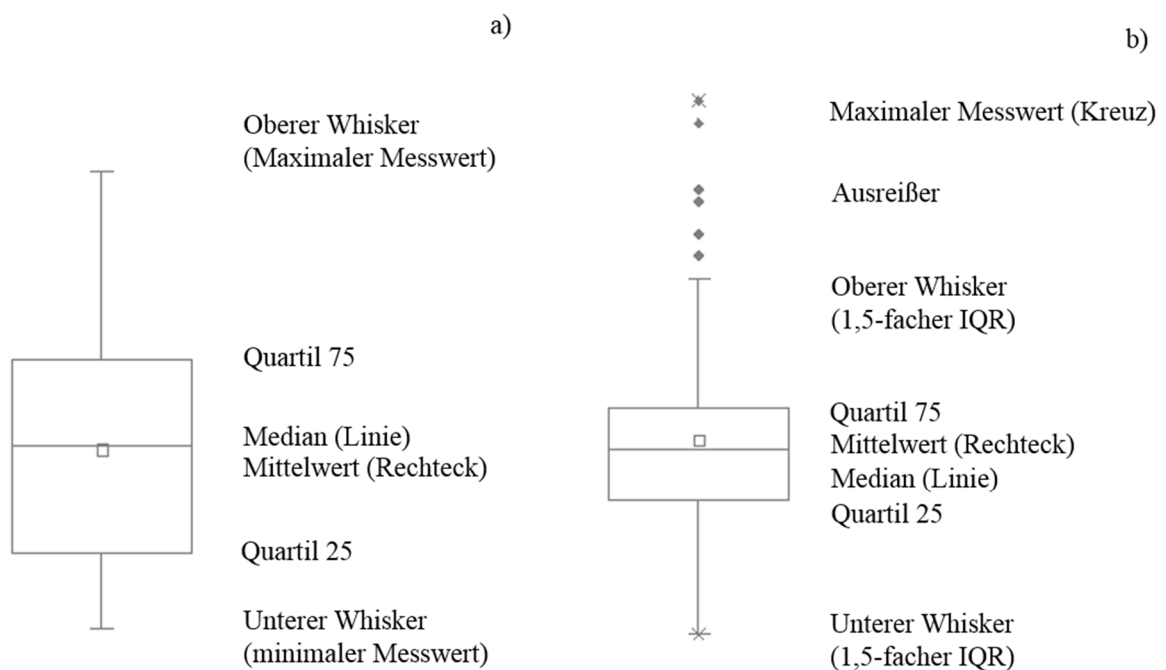
Die statistische Auswertung wurde mit dem Programm SPSS (IBM Corporation, Version 24.0.0.1) durchgeführt. Die Messdaten wurden zunächst mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung getestet. Dieser ist auch für kleine Stichprobenumfänge ab  $n > 3$  geeignet. Lag eine Normalverteilung vor, wurde anhand des t-Tests ein Vergleich der Mittelwerte durchgeführt. Die Varianzhomogenität wurde mit dem Levene-Test geprüft. Nicht normalverteilte Proben wurden mit dem Mann-Whitney-U-Test auf statistische Unterschiede untersucht und werden in den Ergebnistabellen mit einem hochgestellten  $x^{(x)}$  markiert. Dieser kann ab einer Stichprobenzahl von  $n \geq 4$  angewendet werden. Jedoch muss bei einem geringen Stichprobenumfang die Streuung der Messwerte sehr hoch sein, um signifikante Unterschiede ausweisen zu können. Aus diesem Grund müssen die Ergebnisse mit kleiner Stichprobenzahl kritisch betrachtet werden. Für die Bodenanalysen konnten zum Teil keine statistische Auswertung durchgeführt werden, da die Stichprobenzahl unter 4 lag.

Die Signifikanzniveaus werden wie folgt angegeben:

- Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p \leq 0,05$  = signifikant (\*)
- Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p \leq 0,01$  = hoch signifikant (\*\*)
- Irrtumswahrscheinlichkeit von  $p \leq 0,005$  = höchst signifikant (\*\*\*)

Lineare Zusammenhänge von normalverteilten Proben wurden nach Pearson auf Signifikanz getestet. Für die Berechnung des Korrelationskoeffizienten von nicht normalverteilten Proben wurde der Spearmans Rho Test verwendet. In der anschließenden Regressionsanalyse wurde das Bestimmtheitsmaß, auch Determinationskoeffizient ( $R^2$ ), zur Beurteilung der Güte des Zusammenhangs der Messvariablen, ermittelt. Die Stärke der Korrelation bzw. Regression wird nach Fowler *et al.* (2006) wie folgt eingeteilt:  $R^2 < 0,04$  = sehr schwach,  $R^2$  zwischen 0,04 und 0,15 = schwach,  $R^2$  zwischen 0,15 und 0,49 = mittel und  $R^2 > 0,49$  als stark.

Die Ergebnisse werden unter anderem als Box-Whisker-Diagramm (Boxplot) graphisch dargestellt. Dabei entspricht die Box dem Bereich, in dem sich die mittleren 50 % der Daten befinden (Abbildung 5-2). Der Mittelwert wird durch ein Quadrat gekennzeichnet, der Median als Linie dargestellt. Für die Darstellung der Ergebnisse aus den Pflanzenbonituren wurde aufgrund geringer Wiederholungsmessungen ( $n < 30$ ) die vereinfachte Darstellung gewählt, bei der die Whisker den jeweils minimalen und maximalen Messwert darstellen (Abbildung 5-2a). Für die Darstellung der Ergebnisse der Faserqualitäten und der Niederschlagsereignisse mit hohen Messwiederholungen ( $n > 30$ ) beschreiben die Whisker den 1,5-fachen Interquartilabstand (IQR). Darüber dargestellte Werte (Rauten) stellen Ausreißer dar. Der minimale bzw. maximale Messwert wird durch ein Kreuz veranschaulicht (Abbildung 5-2b).

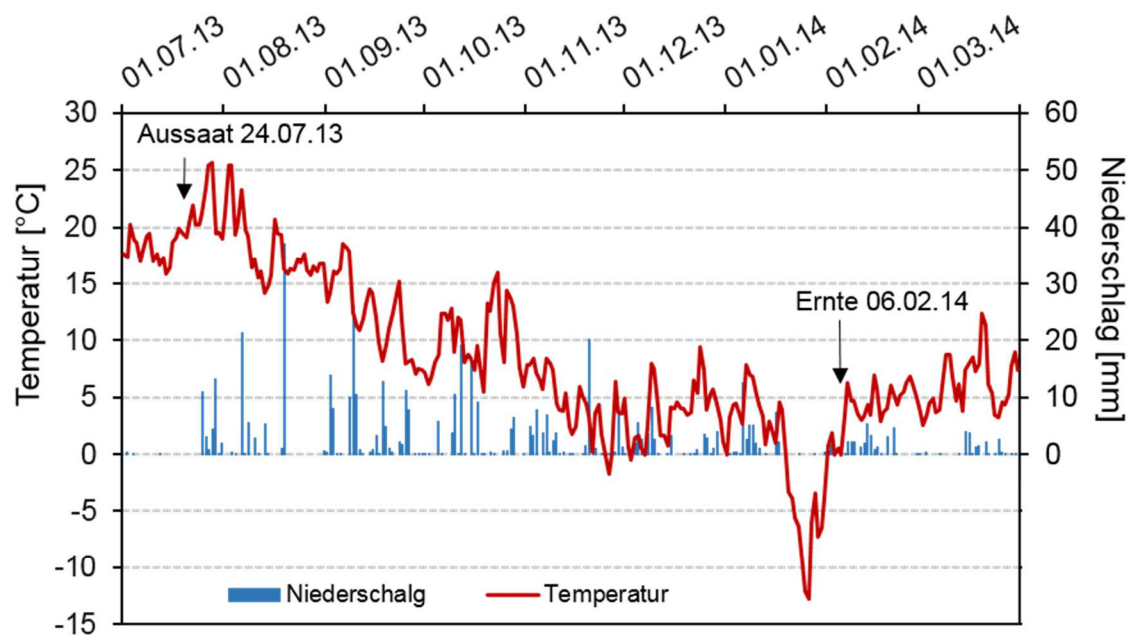


**Abbildung 5-2: Box-Whisker-Plot, vereinfachte Darstellung (a) und Darstellung mit Whiskern und Ausreißern (b)**

## 6 Ergebnisse Winteranbau 2013/14

### 6.1 Wetterdaten Winteranbau 2013/14

Der Verlauf der Tagesmittelwerte sowie die Tagesniederschlagssummen des Standortes Lärz ist in Abbildung 6-1 aufgetragen. In der darunterliegenden Tabelle befinden sich die Monatsmitteltemperatur, die monatliche Niederschlagssumme, sowie die Anzahl der monatlichen Regentage. Die Aussaat des Hanfes wurde am 24.07.2013 durchgeführt und fiel in eine Phase mit steigenden Tagesmittelwerten und einsetzenden Niederschlägen, nach dem bis dahin eher kühlen und niederschlagsarmen Juli. Damit herrschten optimale Bedingungen für die Keimung und das Auflaufen des Hanfes. Im Hauptwachstumsmonat August fiel eine Niederschlagsmenge von 75,2 mm, verteilt auf 12 Regentage. Der erste Frosttag wurde am 25.11.2013 erfasst. Nach einem frostfreien Dezember folgte ab dem 19.01.2014 eine 13-tägige Frostphase, bei der die Tagesmittel unter 0°C blieben. Der kälteste Tag war der 26.01.2014 mit einem Tagesmittelwert von -12,8°C. Aufgrund der besseren Befahrbarkeit des Ackers im gefrorenen Zustand, wurde der Hanf am Standort Lärz am 06.02.2014 geerntet.



	Jul 13	Aug 13	Sep 13	Okt 13	Nov 13	Dez 13	Jan 14	Feb 14	Mrz 14
Monatsmitteltemperatur [°C]	19,3	18,0	12,3	10,1	4,4	3,7	-0,4	4,1	6,2
Niederschlagssumme [mm]	35,4	75,2	117,6	79,8	66,6	41,8	40,6	31,6	17,8
Anzahl Regentage	10	12	25	21	23	20	17	18	17

Abbildung 6-1: Wetterdaten des Standortes Lärz, Winteranbau 2013/14



Für den Standort Vermold wurden die in Abbildung 6-2 dargestellten Temperatur und Niederschlagsverläufe erfasst. Gleich dem Standort Lärz erfolgte die Aussaat des Hanfes im Winteranbau am 24.07.2013. Ebenso setzten auch hier die Niederschläge passend zur Aussaat wieder ein, nachdem der Juli mit einer Niederschlagssumme von 26,9 mm, verteilt auf 7 Tage, sehr trocken ausfiel. Der erste Frosttag wurde am 25.11.2013 aufgezeichnet. Danach folgte ein sehr milder Winter. Erst Ende Januar folgten weitere wenige Frosttage. Der Hanf wurde in Vermold am 09.03.2014 geerntet.

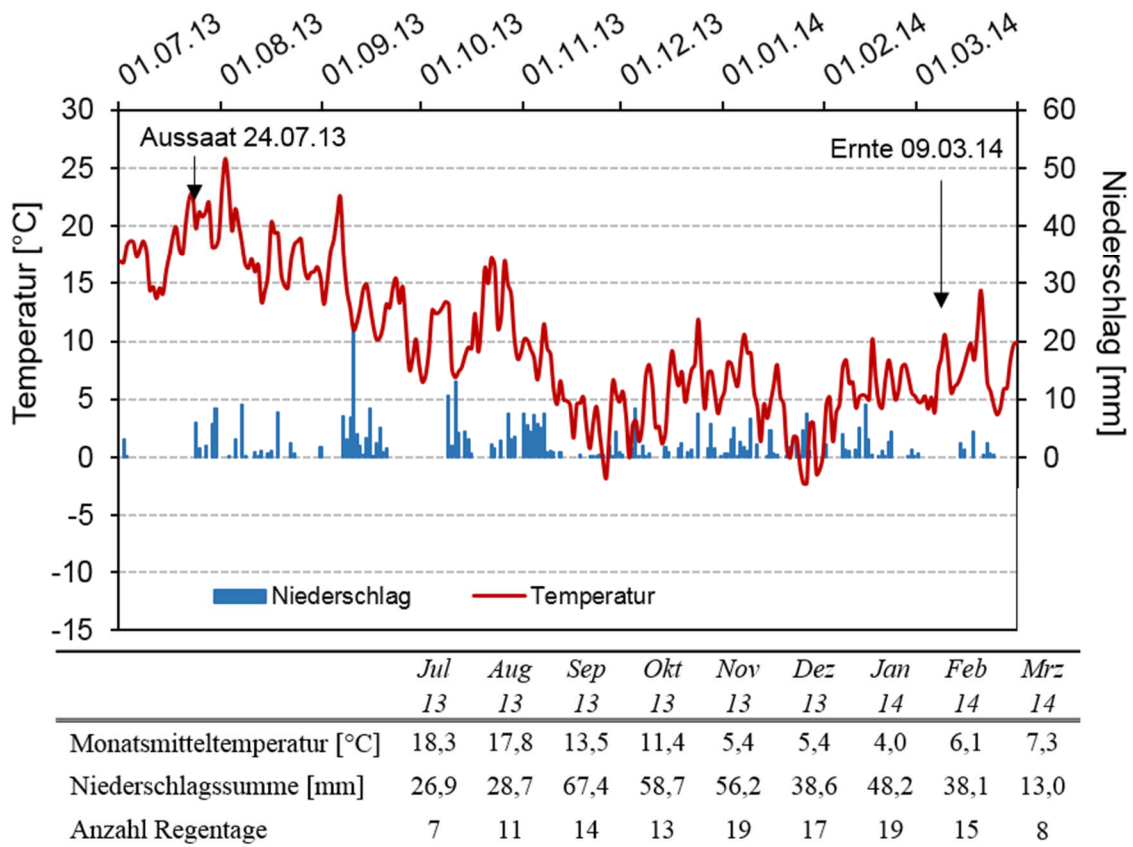


Abbildung 6-2: Wetterdaten des Standortes Vermold, Winteranbau 2013/14

Die Temperaturverläufe der beiden Standorte unterscheiden sich über den gesamten Anbau von Juli 2013 bis März 2014 signifikant voneinander ( $p = 0,015^*$ ). Bei der Betrachtung der einzelnen Monate können nur über die Wintermonate, von Dezember bis Februar, signifikante Unterschiede zwischen den Temperaturen nachgewiesen werden (Anhang 14). Dabei sind die Temperaturen am Standort Lärz signifikant niedriger als am Standort Vermold. Für die Wachstumsmonate Juli bis Oktober unterscheiden sich die beiden Standorte nicht voneinander. Die Niederschlagssummen bringen keine signifikanten Unterschiede über den gesamten Zeitraum hervor. Im monatlichen Vergleich heben sich nur die Niederschläge des Monats Septembers signifikant zwischen den beiden Standorten ab ( $p = 0,049^*$ ). Der Standort Lärz war mit 117,6 mm Niederschlag deutlich regenreicher als der Standort Vermold mit 67,4 mm.

In Abbildung 6-3 sind die Monatsmitteltemperaturen und monatlichen Niederschlagssummen des Standortes Lärz (a) und des Standortes Versmold (b) für den Winteranbau 2013/14 (Linie mit Symbolen) vor dem Hintergrund des langjährigen Mittels von 1961-1990 (einfache Linie) dargestellt. Temperatur zu Niederschlag ist nach Walter und Lieth (1967) im Verhältnis 1:2 aufgetragen.

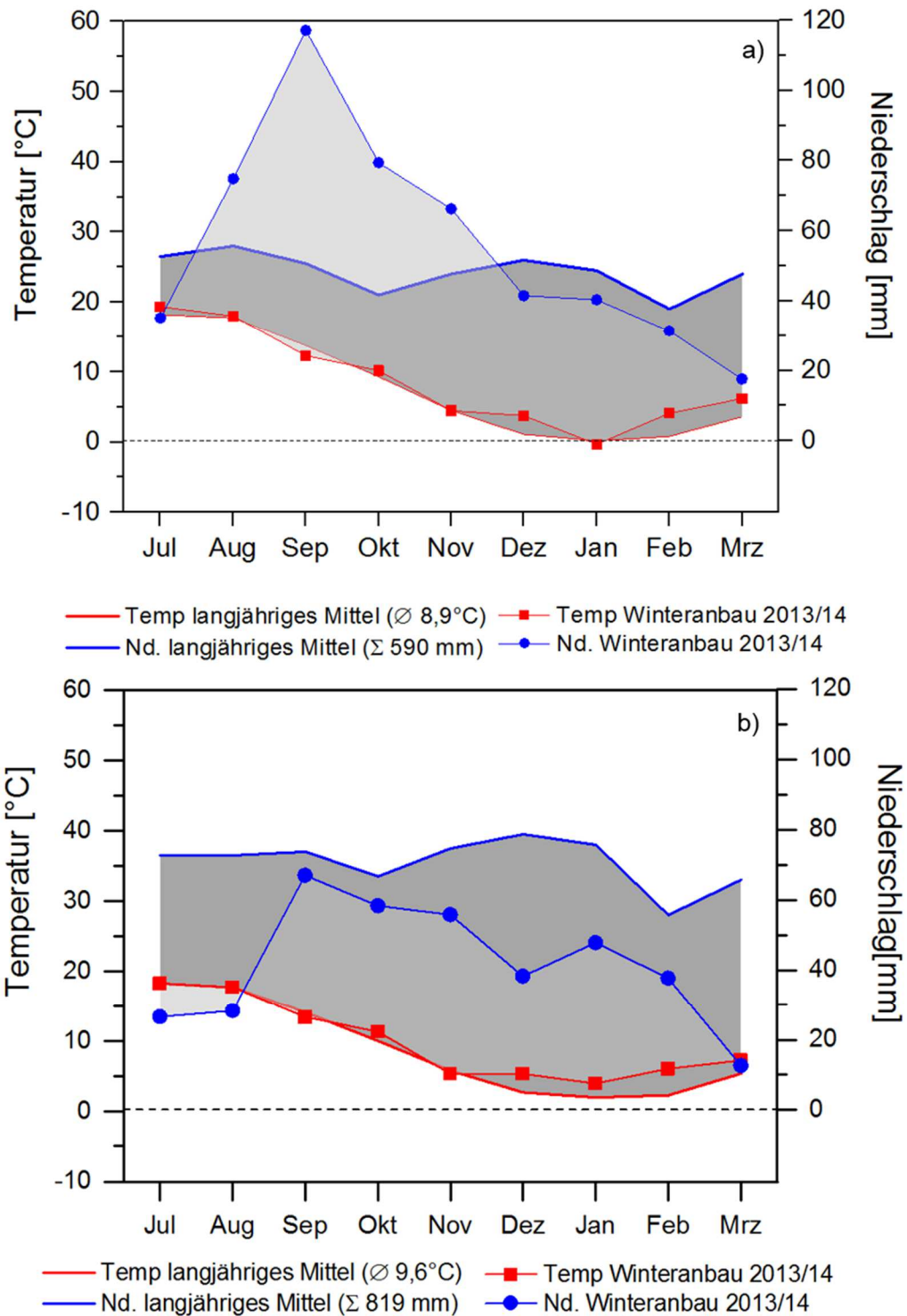


Abbildung 6-3: Vergleich langjähriges Mittel zu den aktuellen Temperatur- und Niederschlagsverläufen der Standorte Lärz (a) und Versmold (b)

Im langjährigen Mittel herrscht auf den Versuchsstandorten über die Zeit von Juli bis März ein humides Klima, d.h. die Niederschlagskurve liegt über der Temperaturkurve. Die Temperaturverläufe des Winteranbaus 2013/14 heben sich weniger stark vom langjährigen Mittel ab als die Niederschlagssummen. An beiden Standorten war der Winter 2013/14 etwas milder als das langjährige Mittel. Diese Unterschiede können jedoch nicht statistisch belegt werden (Anhang 14). Der Verlauf der monatlichen Niederschlagssummen des langjährigen Mittels ist an beiden Standorten ähnlich, jeweils mit einem leichten Absinken der Niederschläge in den Monaten Oktober und Februar. Am Standort Vermold sind die monatlichen Niederschlagsmengen signifikant höher als am Standort Lärz ( $p \leq 0,001^{***}$ ). Dieses spiegelt sich in der Jahresniederschlagssumme von 819 mm für Vermold und 550 mm für Lärz wider. Die monatlichen Niederschlagsmengen im Winteranbau 2013/14 heben sich deutlich vom langjährigen Mittel ab. Am Standort Vermold sind die Monate Juli und August 2013 niederschlagsärmer als im langjährigen Mittel. Die Kurve der Niederschläge fällt für diese beiden Monate unter die Kurve der Temperaturen, so dass diese Monate nach Definition von Walter und Lieth (1967) als arid gelten. Für den Zeitraum von Juli bis Oktober sind die Niederschläge im Winteranbau 2013/14 für den Standort Vermold signifikant niedriger als die des langjährigen Mittels ( $p = 0,045^*$ ). Für den gesamten Winteranbau 2013/14 befinden sich die monatlichen Niederschlagssummen unter der Kurve des langjährigen Mittels. Dieser Unterschied kann statistisch belegt werden ( $p \leq 0,001^{***}$ ). Am Standort Lärz liegen die monatlichen Niederschläge der Monate August bis November des Winteranbaus 2013/14 deutlich über denen des langjährigen Mittels. Allerdings kann dieser Trend nicht statistisch verifiziert werden (Anhang 14).

Die Einteilung der Wasserverfügbarkeit nach der Klassifikation nach Walter und Lieth (1967) wird hauptsächlich für langjährige Mittel angewendet und eignet sich weniger für die stark schwankenden, jährlichen Witterungsverläufe. Daher wurde zur Bestimmung der Wasserversorgung von landwirtschaftlichen Kulturpflanzen die modifizierte Darstellung nach Heyland (1991) herangezogen. Hierbei werden die monatlichen Durchschnittstemperaturen und die Niederschlagssummen im Verhältnis 1:4 aufgetragen. In Monaten, in denen die Temperaturkurve über der Niederschlagskurve liegt, besteht für die Ackerpflanzen ein potentieller Wassermangel. Dies ist eine vereinfachte Methode, bei der von einer Verdunstung von 40 mm bei 10°C ausgegangen wird, um schnell einen Überblick über die jährlichen Wasserhältnisse zu bekommen. Unterschiedliche Verdunstungsraten, sowie der individuellen Wasserbedarf der verschiedenen Feldfrüchte werden dabei außer Acht gelassen. Um genaue Aussagen treffen zu können, müssten Verdunstungsmessungen an den Standorten durchgeführt werden. Des Weiteren gibt es eine Vielzahl von Berechnungsmodellen der Evapotranspiration, die aufgrund ihrer Komplexität den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden.

Am Standort Lärz ergibt sich für den Monat Juli ein potentieller Wasserstress für die Hanfpflanzen, da die Temperaturkurve über der des Niederschlags liegt (Abbildung 6-4a). Ab August stand den Pflanzen wieder eine ausreichende Wasserversorgung zur Verfügung. Am

Standort Vermold war dagegen erst wieder ab September eine ausreichende Wasserversorgung vorhanden (Abbildung 6-4b).

Obwohl sich die Niederschlagsverläufe der beiden Standorte nicht signifikant voneinander unterscheiden, zeigen sie eine hohe Variabilität in ihrer Verteilung. Diese sind im Anhang 15 als Box-Whisker-Diagramm dargestellt. Im Mittel liegen die täglichen Niederschläge für die Monate Juli und August zwischen 0,9 und 2,4 mm. Es gibt jedoch einzelne Regenereignisse, die davon deutlich abweichen. Am Standort Lärz sind die einzelnen Regenereignisse höher als am Standort Vermold. Dies gilt besonders für den Monat August, in dem es am Standort Lärz ein Starkregenereignis von 40 mm/Tag aufgezeichnet wurde. In der Betrachtung der Monatssummen geht die Verteilung und Höhe der einzelnen Tagesniederschläge unter, die jedoch einen differenzierten Wachstumsverlauf des Hanfbestandes erklären können.

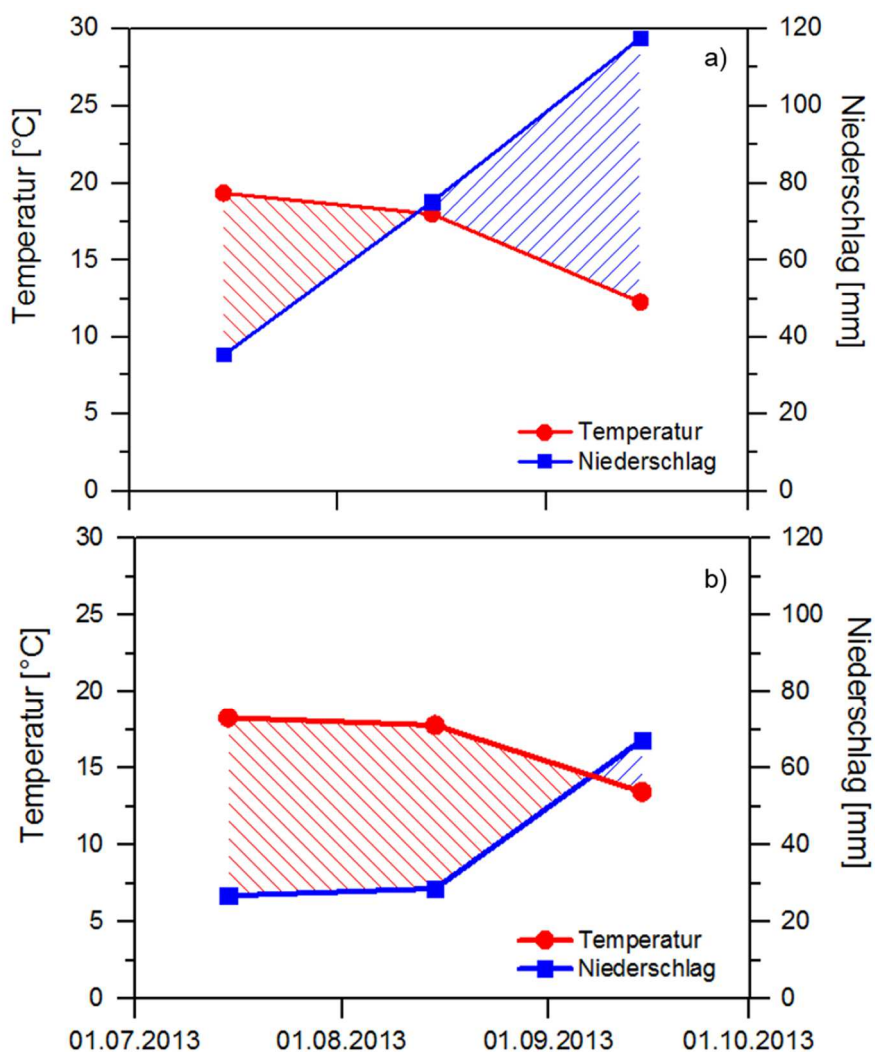


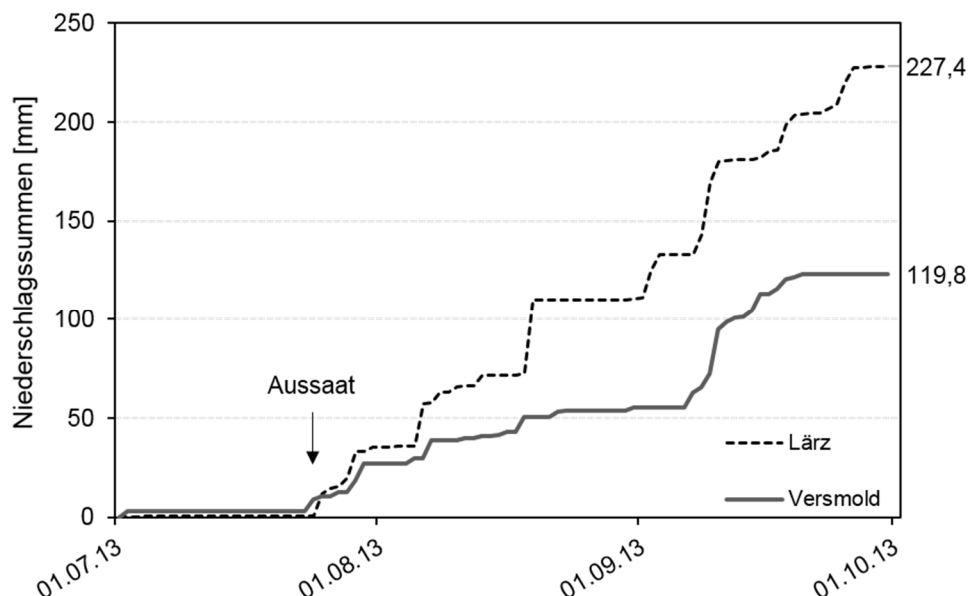
Abbildung 6-4: Wasserverfügbarkeit nach Heyland (1991), Winteranbau 2013/14

Am Standort Lärz fielen von Anfang Juli bis zur Aussaat am 24.07. nur 0,8 mm Niederschlag, am Standort Vermold 3,2 mm. Sieben Tage vor der Aussaat wurden keine Niederschläge aufgezeichnet. Zur Aussaat fiel am Standort Vermold eine Regenmenge von 6 mm.

Am Standort Lärz setzten direkt nach der Aussaat Niederschläge ein, die sich in der Woche nach der Aussaat auf 32,6 mm aufsummierten. Für denselben Zeitraum wurden am Standort Vermold 23,7 mm Niederschlag bestimmt.

In der Literatur werden zur Beschreibung der klimatischen Ansprüche des Hanfes Niederschlags- und Wärmesummen von der Aussaat bis zur technischen Reife (Blühende) angegeben. In Abbildung 6-5 sind die Niederschlagssummen für den Winteranbau 2013/14 dargestellt. Im Zeitraum vom 24.07.13 bis Ende September fielen am Standort Lärz 227,4 mm Niederschlag, am Standort Vermold wurden für den gleichen Zeitraum 119,8 mm gemessen. Somit konnte am Standort Lärz fast die doppelte Regenmenge erfasst werden. Dieser Unterschied lässt sich statistisch belegen ( $p \leq 0,001^{***}$ ).

Während der Hauptwachstumszeit im August stand dem Hanf am Standort Lärz eine Niederschlagsmenge von 75,2 mm und am Standort Vermold von 28,7 mm zur Verfügung. Die Wärmesummen der beiden Standorte verlaufen sehr ähnlich (Anhang 16) und unterscheiden sich statistisch nicht. Am Standort Lärz wurde eine Wärmesumme von 1100,4°C ermittelt, am Standort Vermold von 1115,6°C.



**Abbildung 6-5: Niederschlagssummenkurven der Versuchsstandorte Lärz und Vermold, Winteranbau 2013/14**

## 6.2 Boden

### 6.2.1 Wassergehalte

Die volumetrischen Wassergehalte der einzelnen Bodentiefen aus der niedrigen (a) und hohen Aussaatstärke (b) der verschiedenen Beprobungen sind in Abbildung 6-6 als gestapelte Säulen dargestellt.

Beim Vergleich der Wassergehalte ist darauf zu achten, dass die Beprobungen am Standort Lärz nicht am gleichen Tag wie am Standort Vermold erfolgten, sondern mit einem Tag bis zu einer Woche Zeitversatz. Unterschiede in den Bodenwassergehalten sind zudem nicht nur durch Texturunterschiede oder unterschiedliche Verdunstungsraten begründet, sondern auch durch unterschiedliche Niederschlagsmengen an den Standorten.

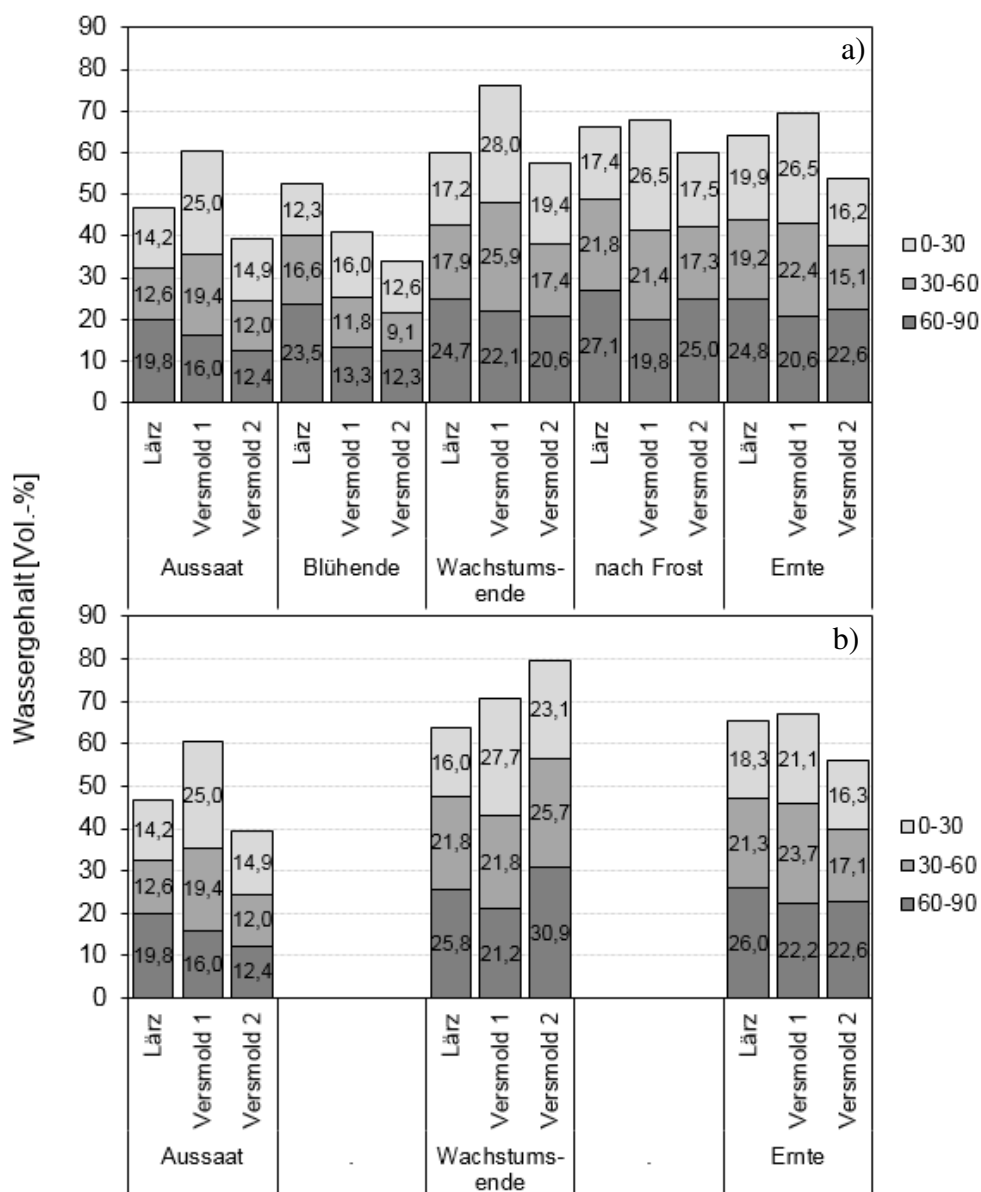


Abbildung 6-6: Volumetrische Wassergehalte im Boden der Versuchsstandorte in den unterschiedlichen Bodentiefen und in den Aussaatstärken 25 kg/ha (a) und 50 kg/ha (b), Winteranbau 2013/14

Zwischen den Wassergehalten der verschiedenen Aussaatstärken der Standorte können keine signifikanten Unterschiede bestimmt werden (Anhang 18). An den Standorten Lärz und Versmold 1 sind die Wassergehalte in der hohen Aussaatstärke im Trend niedriger als in der Aussaatstärke mit 25 kg/ha. Am Standort Versmold 2 wurden dagegen in der hohen Aussaatstärke gleich hohe oder höhere Wassergehalte als in der niedrigen Aussaatstärke bestimmt. Die Wassergehalte des Oberbodens am lehmigen Standort Versmold 1 sind in der niedrigen Aussaatstärke signifikant höher als die der beiden sandigen Standorte Lärz ( $p = 0,019^*$ ) und Versmold 2 ( $p = 0,003^{**}$ ). In der hohen Aussaatstärke ergibt sich nur für den Standort Versmold 1 und Lärz ein signifikanter Unterschied ( $p = 0,012^*$ ). In der niedrigen Aussaatstärke sind die Wassergehalte im Unterboden (60-90 cm) am Standort Lärz signifikant höher als an den Standorten Versmold 1 ( $p \leq 0,001^{***}$ ) und Versmold 2 ( $p \leq 0,001^{***}$ ). Für die hohe Aussaatstärke lässt sich dieser Unterschied nur zwischen dem Standort Lärz und Versmold 1 ( $p = 0,041^*$ ) belegen (Anhang 18).

Die Wassergehalte des Oberbodens aller Standorte befinden sich in der niedrigen und hohen Aussaatstärke zu den Beprobungen während der Wachstumszeit (Aussaat bis Wachstumsende) im Bereich der nutzbaren Feldkapazität (nFK). Diese beschreibt die Menge des Bodenwassers, welches für die Pflanzen nutzbar ist und sich in Poren mit einem Äquivalentdurchmesser zwischen 50  $\mu\text{m}$  (pF 1,8) und 0,2  $\mu\text{m}$  (pF 4,2) befindet. Die nFK wird durch die Bodenart, die Trockenrohdichte und den Humusgehalt bestimmt. Zur Ermittlung dient die Tabelle 70 der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005) (Anhang 17). Am Standort Lärz (St2,  $\text{pt} = 2$ ) liegt die nFK zwischen Wassergehalten von 8 bis 26 %, am Standort Versmold 1 (Lt2,  $\text{pt} = 3$ ) zwischen 22 und 42 % und am Standort Versmold 2 (Sl2,  $\text{pt} = 2$ ) zwischen 8 und 28 %. Allerdings muss beachtet werden, dass die Wassergehalte zu den einzelnen Beprobungen nur eine Momentaufnahme darstellen und nicht die Wasserverfügbarkeit des gesamten Zeitraumes widerspiegeln.

## 6.2.2 Hauptnährstoffe im Boden

Im Folgenden wird auf die Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumgehalte des Bodens eingegangen, die als Hauptnährstoffe für das Pflanzenwachstum gelten. Die Stickstoffgehalte werden als Nitrat-Stickstoff ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) angegeben und in Anlehnung an die  $\text{N}_{\text{min}}$ -Untersuchung wurden die Bodentiefen bis 90 cm herangezogen. Zur Einschätzung der Gehalte an Phosphor und Kalium wurden die jeweiligen Bodengehaltsklassen nach VDLUFA verwendet, die sich auf die oberen 30 cm Boden beziehen.

Kurz vor der Aussaat im Juli wurden alle Versuchsflächen gedüngt, wobei je nach landwirtschaftlicher Ausrichtung der Betriebe, unterschiedliche Wirtschaftsdünger zum Einsatz kamen. Die Flächen am Versuchsstandort Lärz wurden mit einem Gemisch aus je 2 t/ha Rinder- und Putenmist gedüngt. Dies entspricht einer ungefähren Düngegabe von 49 kg N/ha, 18 kg P/ha, sowie 43 kg K/ha (Anhang 13). Die Stickstoffdüngung wurde an diesem Standort redu-

ziert, da als Vorfrucht Wickroggen angebaut wurde. Leguminosen können Luftstickstoff fixieren, der für die Stickstoffbilanz der Ackerfläche angerechnet wird. Am Standort Versmold wurde auf alle Versuchsflächen eine Düngegabe von 20 m<sup>3</sup> Rindergülle/ha aufgebracht, die, unter Annahme eines mittleren Trockensubstanz-(TS)-Gehaltes von 8 %, ca. 78 kg N/ha, 14 kg P/ha und 76 kg K/ha enthielt. Als Vorfrucht wurde Wintergerste angebaut.

### 6.2.2.1 Nitrat-Stickstoff

In Abbildung 6-7 sind die Nitratstickstoffgehalte (NO<sub>3</sub>-N) der Bodentiefen 0-30 cm, 30-60 cm und 0-90 cm dargestellt. In der niedrigeren Aussaatstärke (25 kg/ha, Abbildung 6-7 a) wurden, über die Anbauphase, verteilt fünf Beprobungen durchgeführt (zur Aussaat, Ende Blüte, Ende des Pflanzenwachstums, nach dem ersten Frost und zur Ernte). In der höheren Aussaatstärke (50 kg/ha, Abbildung 6-7 b) wurden über die Anbauphase nur drei Beprobungen durchgeführt (zur Aussaat, zum Wachstumsende und zur Ernte).

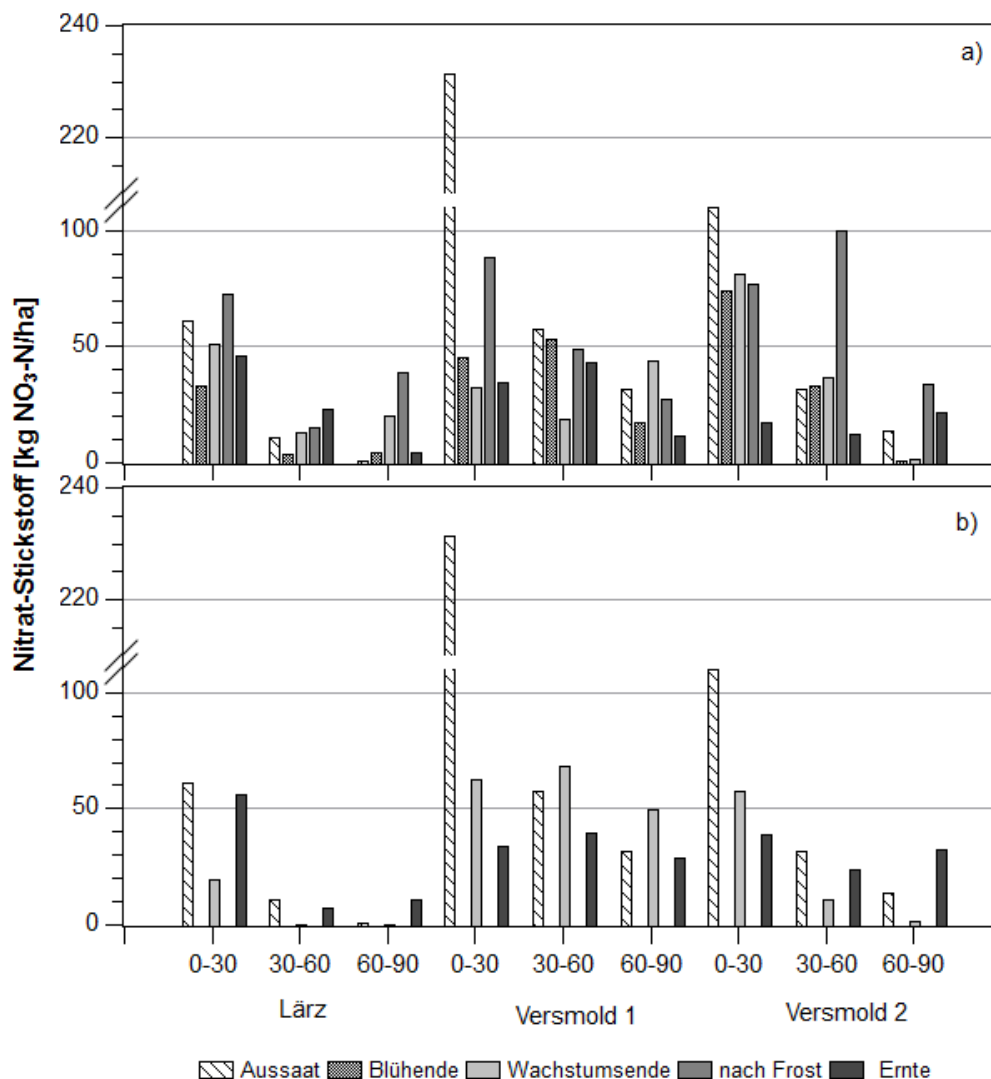


Abbildung 6-7: Nitratstickstoffgehalte in den Aussaatstärken 25 kg/ha (a) und 50 kg/ha (b), Winteranbau 2013/14



Zur Aussaat wurden am Standort Vermold im Oberboden (0-30 cm) deutlich höhere  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalten bestimmt, als am Standort Lärz. Dieser weist einen Gehalt von 61 kg  $\text{NO}_3\text{-N/ha}$  auf, während am lehmigen Standort Vermold 1 231 kg  $\text{NO}_3\text{-N/ha}$  und am sandigen Standort Vermold 2 110 kg  $\text{NO}_3\text{-N/ha}$  gemessen wurden. Zum Blühende verringern sich die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte des Oberbodens der geringeren Aussaatstärke an allen Standorten (Abbildung 6-7 a). Am Standort Vermold 1 ist die Abnahme um 190 kg  $\text{NO}_3\text{-N/ha}$  am höchsten. Auf den sandigen Standorten Lärz und Vermold 2 nahmen die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte um jeweils 30 kg/ha ab. Zum Wachstumsende steigen die Gehalte am Standort Lärz und Vermold 2 in der geringen Aussaatstärke wieder leicht an, wohingegen am Standort Vermold 1 eine weitere Reduktion erfolgt. In der hohen Aussaatstärke kann aufgrund der fehlenden Beprobung zum Blühende nur die Aussage getroffen werden, dass sich der  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalt zum Wachstumsende gegenüber dem zur Aussaat verringert (Abbildung 6-7 b). Nach dem Frost erhöhen sich die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte des Oberbodens am Standort Lärz und Vermold 1 in der niedrigen Aussaatstärke; am Standort Lärz sogar über den Ausgangswert zur Aussaat. Am Standort Vermold 2 nehmen die Gehalte nach dem Frost dagegen leicht ab. In den Bodentiefen von 30-60 cm und 60-90 cm steigen die Gehalte auf allen Standorten nach dem Frost an (Anhang 19).

Zur Ernte befinden sich die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte des Oberbodens auf allen Standorten und Aussaatstärken unterhalb des zur Aussaat bestimmten Gehaltes. Die Abnahme ist dabei am Standorte Vermold 2 in der niedrigen Aussaatstärke am höchsten. Hier reduziert sich der  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalt von 110 auf 18 kg/ha. In den tieferen Bodenschichten von 30-60 cm und 60-90 cm zeigt sich in der niedrigen Aussaatstärke kein einheitlicher Trend zwischen den Standorten, womöglich durch die hohe Mobilität des Nitrats im Boden in Abhängigkeit mit dem Wasserregime. In der hohen Aussaatstärke nehmen die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte im Unterboden (30-60 cm und 60-90 cm) der sandigen Standorte zur Ernte hin zu, während die Gehalte des lehmige Standortes Vermold 2 die höchsten Werte zum Wachstumsende aufweisen.

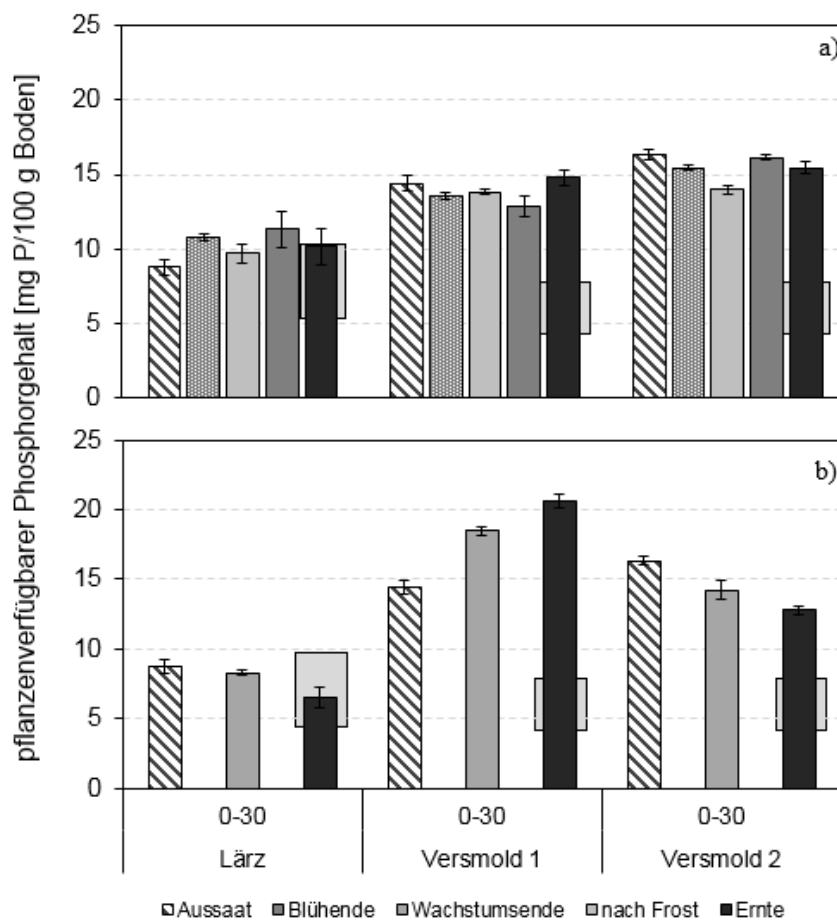
Für die Nitrat-Stickstoffgehalte konnte aufgrund zu geringer Messwerte keine statistische Auswertung durchgeführt werden. Im Trend stand den Hanfpflanzen am Standort Vermold mehr Nitrat-Stickstoff zur Verfügung als am Standort Lärz, da unterschiedlich hohe Dünggaben mit unterschiedlichen Wirtschaftsdüngern ausgebracht wurden. Zur Ernte verblieb im Oberboden am Standort Lärz mehr  $\text{NO}_3\text{-N}$  als an den beiden Vermolder Standorten.

### 6.2.2.2 Phosphor

Die pflanzenverfügbaren Phosphorgehalte ( $P_{DL}$ ) des Oberbodens der niedrigen und hohen Aussaatstärke, die mittels der Doppellactat-Extraktion bestimmt wurden, sind in Abbildung 6-8 a und b dargestellt. Der Bereich der Bodengehaltsklasse C ist als graues Rechteck im Hintergrund eingezeichnet. Die Werte beziehen sich noch auf die Vorgaben der einzelnen Landwirtschaftskammern der Bundesländer, solange keine einheitliche Regelung manifestiert

ist (Anhang 3). Die graue Markierung befindet sich zum Zeitpunkt der Probennahme kurz vor der Ernte, da sich die Bedarfsermittlung auf die Versorgungsstufe im Frühjahr bezieht. Die Gehalte für alle Bodentiefen sind im Anhang 21 aufgeführt.

Die  $P_{DL}$ -Gehalte zeigen über den Anbau hinweg in der niedrigen Aussaatstärke weniger Variabilität als in der hohen Aussaatstärke (Abbildung 6-8 a). Am Standort Lärz liegen die  $P_{DL}$ -Gehalte der niedrigen Aussaatstärke zwischen 8,9 und 11,2 mg/100 g Boden, während die Gehalte an den Standorten in Vermold signifikant höhere Werte zwischen 13,3 und 16,8 mg P/100 g Boden aufweisen ( $p \leq 0,001^{***}$ ). Auch zwischen den Standorten Vermold 1 und Vermold 2 besteht ein signifikanter Unterschied ( $p = 0,003^{**}$ ).



**Abbildung 6-8: Phosphorgehalte der Bodentiefe 0-30 cm in den Aussaatstärken 25 kg/ha (a) und 50 kg/ha (b), Winteranbau 2013/14**

In der hohen Aussaatstärke hebt sich der Verlauf der  $P_{DL}$ -Gehalte am lehmigen Standort Vermold 1 über die Anbauzeit stark von den beiden anderen Standorten ab (Abbildung 6-8 b). Während am Standort Lärz und Vermold 2 eine kontinuierliche Abnahme der  $P_{DL}$ -Gehalte von der Aussaat bis zur Ernte zu beobachten war, nahmen die  $P_{DL}$ -Gehalte am Standort Vermold 1 bis zur Ernte hin zu. Die Gehalte steigen dabei von 15,0 mg zur Aussaat, über 18,2 mg zum Wachstumsende, auf 20,2 mg P/100 g Boden kurz vor der Ernte an. Wie auch in der niedrigen Aussaatstärke wurden am Standort Lärz signifikant niedrigere  $P_{DL}$ -Gehalte gegenüber den Standorten Vermold 1 und Vermold 2 ( $p \leq 0,001^{***}$ ) erhoben.

Während in den unterschiedlichen Aussaatstärke am Standort Vermold 2 kein belegbare Unterschied in Bezug auf die  $P_{DL}$ -Gehalte ermittelt werden kann, bestätigt sich dieser für die Standorte Lärz ( $p \leq 0,001^{***}$ ) und Vermold 1 ( $p = 0,002^{**}$ ) (Anhang 20). Im Frühjahr 2014, kurz vor der Ernte, lagen die  $P_{DL}$ -Gehalte am Standort Lärz in beiden Aussaatstärken innerhalb der Gehaltsklasse C. Dagegen wurden auf den beiden Vermolder Standorten im Frühjahr in beiden Aussaatstärken  $P_{DL}$ -Gehalte in der Gehaltsklasse D bzw. E bestimmt, so dass für die Folgefrucht eine reduzierte bzw. keine Phosphordüngung erfolgen sollte, um einen Phosphorüberschuss zu vermeiden.

### 6.2.2.3 Kalium

Die mit der Doppellactat-Extraktion bestimmten Kaliumgehalte ( $K_{DL}$ ) der Bodentiefe 0-30 cm im Winteranbau 2013/14 sind in Abbildung 6-9 dargestellt. Die Daten für alle Bodentiefen sind als Tabelle im Anhang 22 aufgeführt. Die Aussaatstärke mit 25 kg/ha wird im oberen Teil der Abbildung 6-9 (a) veranschaulicht, die Aussaatstärke mit 50 kg/ha ist darunter angeordnet (b). Die Gehaltsklasse C ist wie bei der Darstellung der  $P_{DL}$ -Gehalte als grauer Kasten im Hintergrund eingezeichnet. Da der Oberboden am Standort Vermold 1 tonreicher ist, gelten für die Gehaltsklasse C hier höhere Werte (Anhang 6).

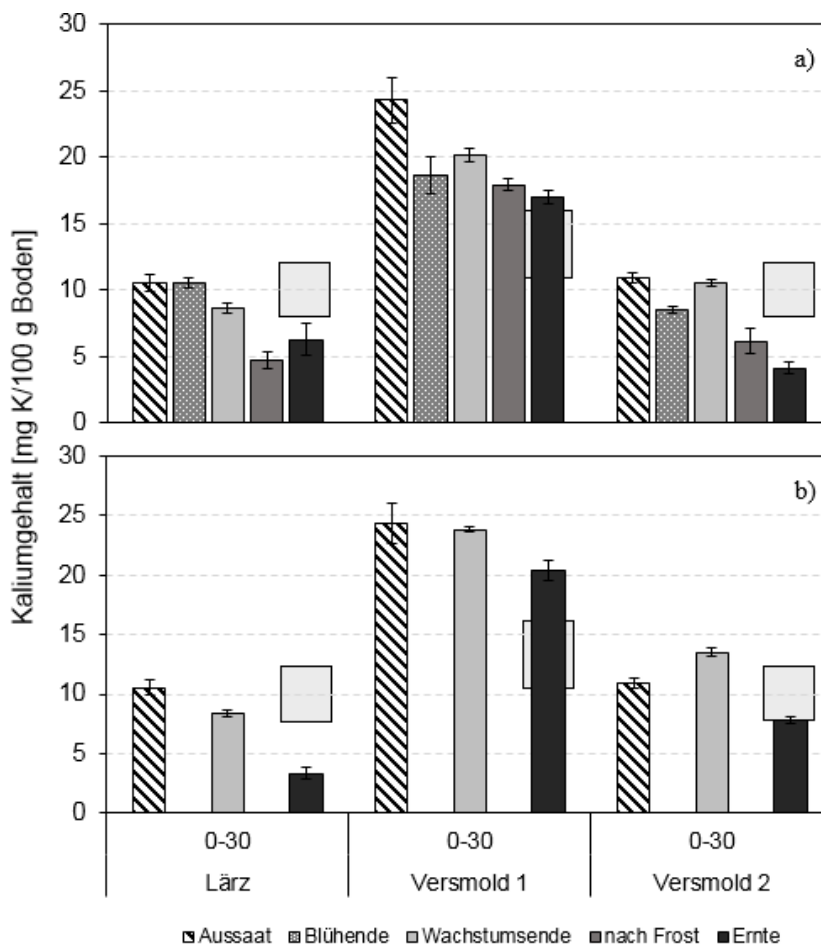


Abbildung 6-9: Kaliumgehalte der Bodentiefe 0-30 cm in den Aussaatstärken 25 kg/ha (a) und 50 kg/ha (b), Winteranbau 2013/14

Die  $K_{DL}$ -Gehalte betragen auf den beiden sandigen Standorten Lärz und Vermold 2 zur Aussaat 11 mg/100 g Boden. Am tonreicheren Standort Vermold 2 ist der  $K_{DL}$ -Gehalt mit 24 mg/100 g Boden doppelt so hoch, der sich dadurch signifikant von den Standorten Lärz und Vermold 1 abhebt ( $p \leq 0,001^{***}$ ). In der niedrigen Aussaatstärke zeigt sich auf beiden Vermolder Standorten eine Reduzierung der Kaliumgehalte im Boden von der Aussaat bis zur nächsten Beprobung zum Blühende, während die Werte am Standort Lärz auf dem gleichen Niveau bleiben. Zum Wachstumsende der Pflanzen erfolgt ein Anstieg der  $K_{DL}$ -Gehalte auf beiden Vermolder Standorten, wohingegen die Gehalte am Standort Lärz weiter sinken. In der hohen Aussaatstärke unterscheidet sich der Verlauf der  $K_{DL}$ -Gehalte über den Anbauzeitraum am Standort Vermold 2 signifikant von dem am Standort Lärz und Vermold 1 ( $p = 0,002^{**}$ ) (Anhang 20). Am Standort Lärz reduzieren sich die  $K_{DL}$ -Gehalte von der Aussaat bis zur Ernte auf 6,9 mg K/100 g Boden in der niedrigen Aussaatstärke und auf 3,7 mg/100 g Boden in der hohen Aussaatstärke. Die Messwerte liegen unterhalb der Gehaltsklasse C, so dass für die Folgefrucht eine erhöhte Kaliumdüngung empfohlen wird. Dieses wurde auch am Standort Vermold 2 in beiden Aussaatstärken festgestellt. Dagegen wurden am Standort Vermold 1  $K_{DL}$ -Gehalte zur Ernte von 16,3 mg K/100 g Boden in der geringen Aussaatstärke und von 19,6 mg K/100 g Boden in der hohen Aussaatstärke gemessen, die die Gehaltsklasse D einnehmen. Zur Folgefrucht sollte hier eine reduzierte Kaliumgabe erfolgen. (Anhang 6). Generell ist ein abnehmender Trend der  $K_{DL}$ -Gehalte von der Aussaat bis zur Ernte auf allen Standorten, sowie in beiden Aussaatstärken zu erkennen. Ein gegenläufiger Trend zeichnet sich für die Höhe der  $K_{DL}$ -Gehalte in den verschiedenen Aussaatstärken der Standorte zur Beprobung zur Ernte ab. Am Standort Lärz wurden höhere  $K_{DL}$ -Gehalte in der hohen Aussaatstärke bestimmt, während auf beiden Vermolder Standorten in der geringen Aussaatstärke höhere  $K_{DL}$ -Gehalte zur Ernte ermittelt wurden. Signifikante Unterschiede zwischen den Aussaatstärken der einzelnen Standorte bestehen nicht (Anhang 20).

### 6.2.3 Heißwasserextrahierbarer Kohlenstoff und Stickstoff

Der heißwasserextrahierbare Anteil des Kohlenstoffs ( $C_{HWE}$ ) stellt den Gehalt an leicht umsetzbaren Kohlenstoffverbindungen, sowie den mikrobiell gebundenen Kohlenstoff dar. In Abbildung 6-10 ist der heißwasserextrahierbare Kohlenstoff der Aussaatstärken 25 kg/ha (a) und 50 kg/ha (b) des Winteranbaus 2013/14 dargestellt. Die Datentabelle ist im Anhang 23 angefügt.

Am Standort Vermold 2 wurden im Oberboden zur Aussaat mit 94,9 mg/100 g Boden die höchsten  $C_{HWE}$ -Gehalte im Vergleich zu den anderen Standorten gemessen. Danach folgen die Gehalte am Standort Lärz mit 78,2 mg C/100 g Boden. Die  $C_{HWE}$ -Gehalte sind am lehmigen Standort Vermold 1 mit 73,2 mg/100 g Boden am geringsten. Der Unterschied der Gehalte ist zwischen den Standorten Vermold 1 und 2 für die niedrige ( $p = 0,042^*$ ) und hohe Aussaatstärke ( $p = 0,032^*$ ) signifikant. Zwischen den Aussaatstärken an den einzelnen Standorten können keine statistisch belegbaren Unterschiede bestimmt werden (Anhang 20).

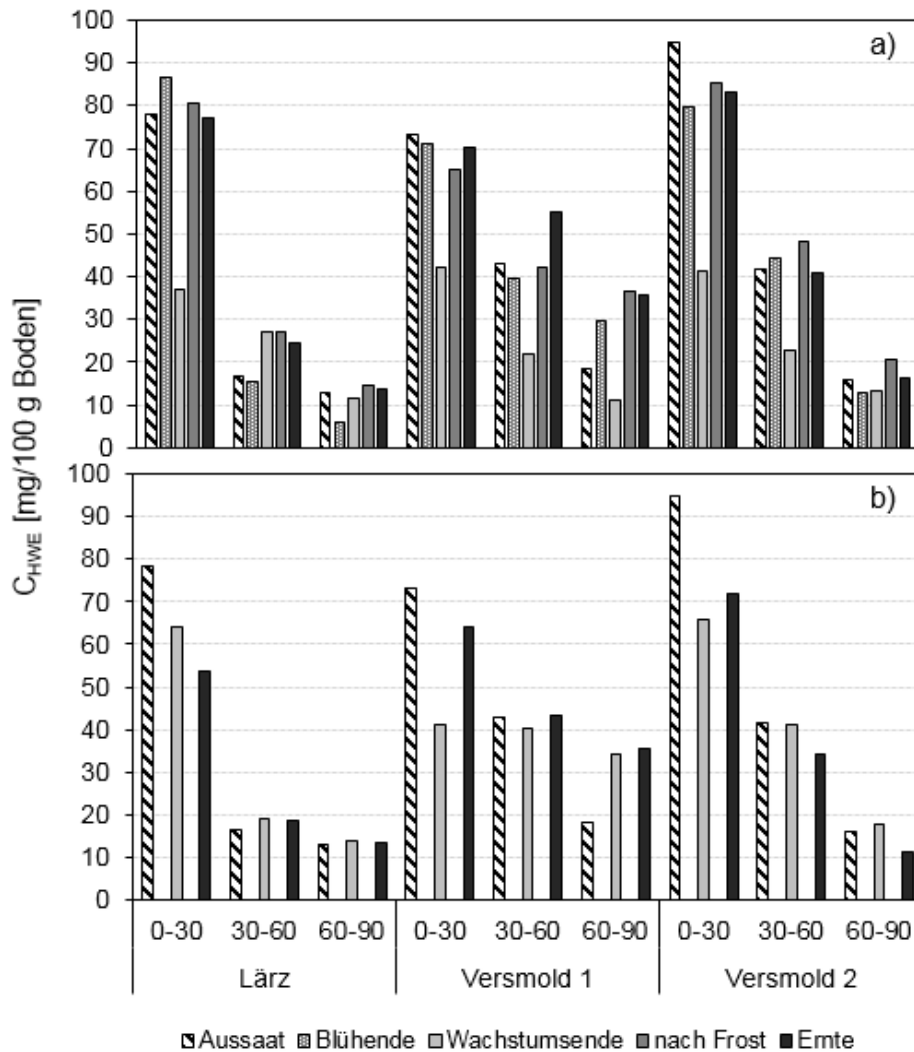


Abbildung 6-10: Heißwasserextrahierbarer Kohlenstoff in den Aussaatstärken 25 kg/ha (a) und 50 kg/ha (b), Winteranbau 2013/14

Über die Anbauzeit hinweg ergeben sich saisonale Schwankungen. Zur Probennahme zum Wachstumsende nimmt der leicht verfügbare Kohlenstoff in der oberen Bodentiefe von 0-30 cm auf allen Standorten und in beiden Saatstärken ab. In der niedrigen Aussaatstärke ist die Abnahme stärker als in der hohen Aussaatstärke. Zur nächsten Beprobung nach dem Frost steigen die  $C_{HWE}$ -Gehalte in der niedrigen Aussaatstärke wieder auf vergleichbare Werte wie zur Aussaat und zum Blühende an. Auf den beiden Vermolder Standorten ist dieser Verlauf auch in der Bodentiefe von 30-60 cm zu erkennen. Durch die ehemalige Plaggennutzung sind die  $C_{HWE}$ -Gehalte in der Bodentiefe 30-60 cm signifikant höher als am Standort Lärz ( $p \leq 0,001^{***}$ ) (Anhang 20). In der hohen Aussaatstärke ist die Reduktion der  $C_{HWE}$ -Gehalte von der Aussaat bis zur Ernte stärker als in der niedrigen Aussaatstärke. Zur Ernte wurden am Standort Lärz Gehalte von 53,8 mg, am Standort Vermold 1 von 64,0 mg und am Standort Vermold 2 von 71,8 mg  $C_{HWE}/100$  g Boden gemessen.

Der Gehalt an heißwasserlöslichen Kohlenstoffstoff ist positiv mit dem Anteil an organischem Kohlenstoff korreliert. Das Bestimmtheitsmaß über alle Standorte hinweg beträgt 91 % ( $p \leq 0,001$ ,  $n = 9$ ) (Anhang 25).

Die  $C_{org}$ -Gehalte sind aufgrund der ehemaligen Plaggenbewirtschaftung auf den Vermolder Standorten in den oberen Bodenschichten höher als im Standort Lärz (Anhang 24). Dagegen konnten auf den sandigen Standorten Lärz und Vermold 2 höhere  $C_{HWE}$ -Gehalte bestimmt werden als auf dem lehmigen Standort Vermold 1 auf. Der Anteil  $C_{HWE}$  am  $C_{org}$  beträgt in den oberen 30 cm Bodentiefe zwischen 5 und 7,3 %, wobei der Anteil am Standort Lärz am höchsten ist, gefolgt vom Standort Vermold 2 mit 6,2 % (Anhang 24).

Der heißwasserextrahierbare Stickstoff ( $N_{HWE}$ ) beschreibt den potentiell nachlieferbaren, organisch gebundenen Stickstoff im Boden. Die Gehalte an  $N_{HWE}$  des Winteranbaus 2013/14 sind in Abbildung 6-11 a für die niedrige Aussaatstärke und in Abbildung 6-11 b für die höhere Aussaatstärke präsentiert.

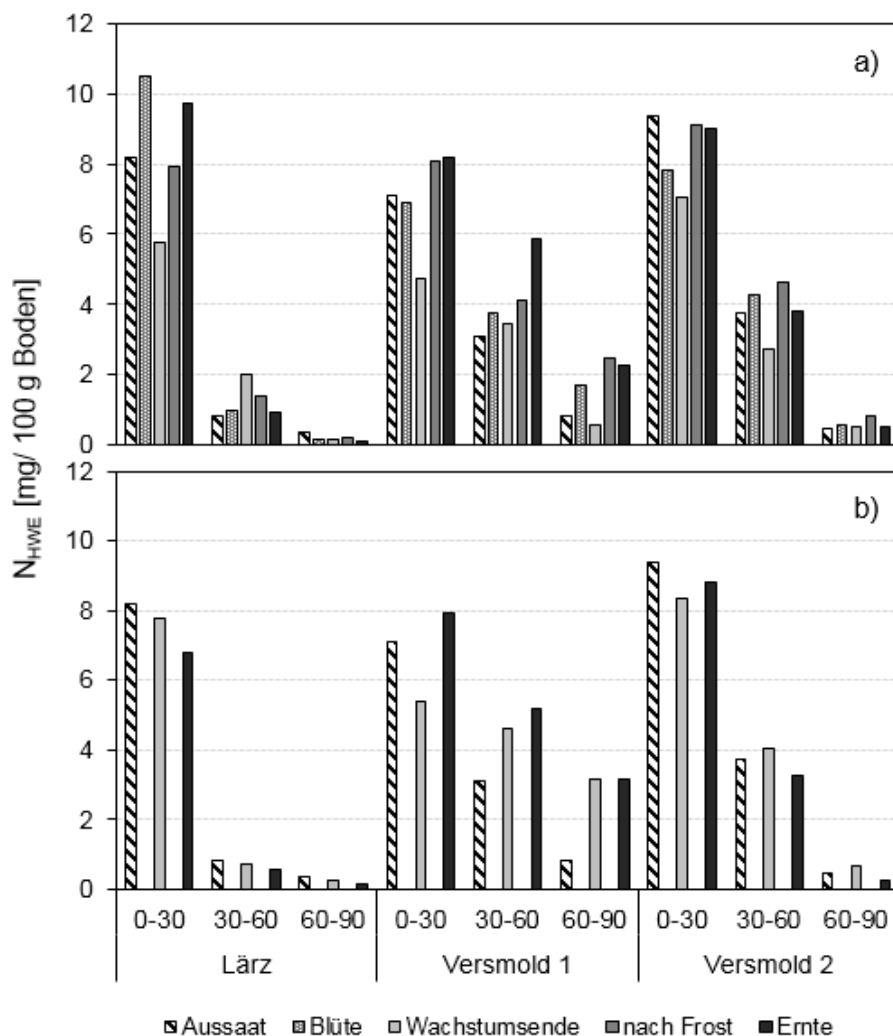


Abbildung 6-11: Heißwasserextrahierbarer Stickstoff und Gesamtstickstoff in den Aussaatstärken 25 kg/ha (a) und 50 kg/ha (b), Winteranbau 2013/14

Die  $N_{HWE}$ -Gehalte sind eng mit den  $C_{HWE}$ -Gehalten korreliert ( $p \leq 0,001$ ,  $R^2 = 0,92$ ,  $n = 63$ ), und zeigen einen ähnlichen Verlauf über die Anbauphase. Die Gehalte zur Aussaat betragen in der niedrigen Aussaatstärke für den Standort Lärz 8,2 mg, für die Standorte Vermold 1 und 2 7,1 bzw. 9,4 mg/100 g Boden (Anhang 26). Gleich den  $C_{HWE}$ -Gehalten fallen die  $N_{HWE}$ -Gehalte in der niedrigen Aussaatstärke stark zum Wachstumsende ab und steigen über die Probennahme nach dem Frost bis zur Ernte wieder an. In der niedrigen Aussaatstärke sind die  $N_{HWE}$ -Gehalte des Oberbodens am Standort Vermold 1 signifikant niedriger als an den Standorten Lärz ( $p = 0,023^*$ ) und Vermold 2 ( $p \leq 0,001$ ). Zwischen den Aussaatstärken der einzelnen Standorte bestehen keine signifikanten Unterschiede. In der hohen Aussaatstärke fällt der  $N_{HWE}$ -Gehalt am Standort Lärz kontinuierlich bis zur Ernte hin ab und weist einen Wert von 6,8 mg N/100 g Boden auf. Auf den beiden Vermolder Standorten steigen die  $N_{HWE}$ -Gehalte dagegen vom Wachstumsende bis zur Ernte an und betragen 7,9 mg (Vermold 1) und 8,8 mg N/100 g Boden (Vermold 2). Der Unterschied ist signifikant ( $p = 0,019^*$ ). Die  $N_{HWE}$ -Gehalte der Vermolder Standorte in den Bodentiefen 30-60 sind aufgrund der Plagenbewirtschaftung in der Vergangenheit signifikant höher als am Standort Lärz ( $p \leq 0,001^{***}$ ) (Anhang 20). Auch für den Stickstoff ergibt sich, wie zuvor beim Kohlenstoff, eine starke Korrelation zwischen dem heißwasserextrahierbaren Anteil und dem Gesamtgehalt ( $p \leq 0,001$ ,  $R^2 = 0,88$ ,  $n = 9$ ) (Anhang 27).

Die  $N_t$ -Gehalte zeigen deutlich geringere Werte auf als die  $C_{org}$ -Gehalte (Anhang 28) und nehmen ebenfalls mit zunehmender Bodentiefe ab. Die höchsten  $N_t$ -Gehalte wurden im Oberboden des Standortes Vermold 2 mit 136 mg N/100 g Boden bestimmt, ebenso die höchsten  $N_{HWE}$ -Gehalte mit 9,4 mg/100 g Boden. Am Standort Lärz konnten mit 8,2 mg ( $N_{HWE}$ ) und 99 mg/100 g Boden ( $N_t$ ) die niedrigsten Gehalte nachgewiesen werden.

## 6.3 Pflanzen

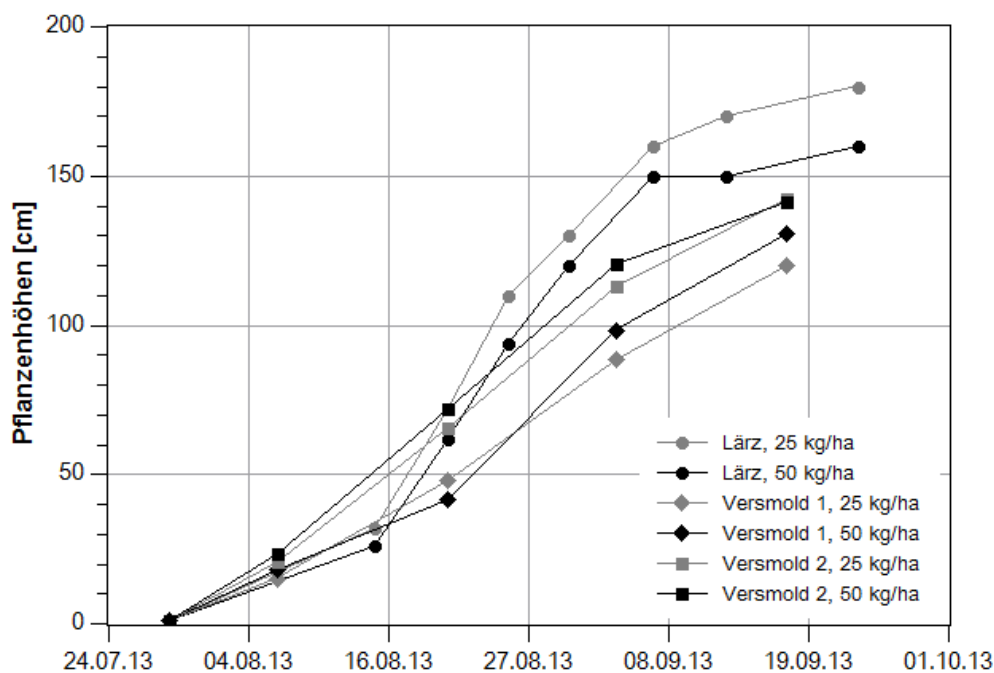
### 6.3.1 Pflanzenbonituren

Die Aussaat der Hanfsamen erfolgte auf allen Standorten am 24.07.2013 mit den Aussaatstärken 25 kg und 50 kg Saatgut pro Hektar. Dies entspricht ungefähr 130 bzw. 260 Samen pro Quadratmeter. Die Keimlinge liefen ca. fünf Tage später auf. Eine fünffache Auszählung Anfang August ergibt die in Tabelle 6-1 aufgeführten Pflanzenzahlen. Der Pflanzenauflauf blieb auf den Standorten Lärz und Vermold 1 deutlich unter dem Sollwert. Die Auflaufraten für die beiden Standorte liegen zwischen 61,5 und 73,1 %. Am Standort Vermold 2 wurden für die beiden Aussaatstärken jeweils 140 und 304 Pflanzen/m<sup>2</sup> gezählt, wodurch sich Auflaufraten von über 100 % ergeben.

**Tabelle 6-1: Aussaatstärke und Pflanzenzahlen pro Quadratmeter nach dem Auflaufen, Winteranbau 2013/14**

<i>Standort</i>	<i>Aussaatstärke</i> [kg/ha]	<i>Körner/m<sup>2</sup></i> <i>soll</i>	<i>Pflanzenauflauf</i> (Pfl./m <sup>2</sup> )	<i>Auflauftrate</i> [%]
Lärz	25	130	94	72,3
Lärz	50	260	186	71,5
Versmold 1	25	130	80	61,5
Versmold 1	50	260	190	73,1
Versmold 2	25	130	140	107,7
Versmold 2	50	260	304	116,9

Das Pflanzenwachstum wurde von den Landwirten nach dem Auflaufen der Pflanzen bis zum Blühende in fünffacher Wiederholung ca. alle 14 Tage bonitiert und ist in Abbildung 6-12 veranschaulicht. Der jeweils hellere Farbton einer Farbe beschreibt die niedrigere Aussaatstärke mit 25 kg/ha, der dunklere Farbton stellt die höhere Aussaatstärke mit 50 kg/ha dar.

**Abbildung 6-12: Verlauf des Pflanzenwachstums bis zur Blüte, Winteranbau 2013/14**

Da Hanf eine Kurztagpflanze ist und mit kürzer werdenden Tagen in die generative Phase (Blüte) übergeht, wird das Längenwachstum zu diesem Zeitpunkt so gut wie eingestellt. Die kritische Tageslänge variiert je nach Sorten und Wachstumsbedingungen zwischen 12 bis 16 Stunden (Anhang 29). Der Blühbeginn wurde im Rahmen der Bonitur durch die Landwirte nicht vermerkt. Aufgrund des Wachstumsverlaufes kann der Blühbeginn ungefähr auf Anfang September terminiert werden. Die Jugendentwicklung dauerte ca. zwei bis drei Wochen und lässt sich durch die großen Boniturabstände und der Interpolierung zwischen den Messpunkten nur grob abschätzen. Etwa ab Mitte August gingen die Pflanzen in die Phase des schnellen



Wachstums über. Während des Zeitraums vom 15. bis 26.08.13 ergeben sich am Standort Lärz tägliche Zuwachsraten von 7,1 cm in der niedrigen und 6,2 cm pro Tag in der hohen Aussaatstärke. Zum Ende des Längenwachstums erreichen die Pflanzen eine Höhe von 185 cm bzw. 162 cm.

Am Standort Vermold wird aufgrund anderer Boniturstände der Zeitraum vom 07.08. bis 04.09.13 betrachtet. Für den Standort Vermold 1 errechnen sich darüber tägliche Zuwachsraten von 2,6 cm in der niedrigen Aussaatstärke und 2,9 cm pro Tag in der hohen Aussaatstärke. Zum Wachstumsende wurden in der höheren Saatstärke mit 130 cm ca. 10 cm höhere Pflanzen als in der niedriger Aussaatstärke mit 120 cm gemessen. Am Standort Vermold 2 ist der tägliche Zuwachs in beiden Aussaatstärken mit 3,3 cm pro Tag gleich, ebenso wie die Pflanzhöhen mit 142 cm zum Ende des Längenwachstums. In der statistischen Auswertung können keine signifikanten Unterschiede im Wachstumsverlauf zwischen den unterschiedlichen Aussaatstärken der jeweiligen Standorte festgestellt werden. In der niedrigen Aussaatstärke hebt sich der Wachstumsverlauf der Hanfpflanzen am Standort Lärz signifikant von denen am Standort Vermold 1 ( $p \leq 0,001^{***}$ ) und Vermold 2 ( $p = 0,008^*$ ) ab. Zwischen dem Wachstumsverlauf der beiden Standorte in Vermold ergeben sich keine statistischen Unterschiede. In der hohen Aussaatstärke besteht nur zwischen dem Standort Lärz und dem Standort Vermold 1 ein statistischer Unterschied in Bezug auf den Wachstumsverlauf ( $p = 0,003^{**}$ ).

In Tabelle 6-2 sind die Pflanzhöhen der Feldbeprobung zum Zeitpunkt des Blühendes zusammengefasst. Diese unterscheiden sich leicht zu den Werten, die von den Landwirten vermessen wurden (Abbildung 6-12). Dies ist in der hohen Variabilität der Pflanzhöhen im Bestand während des Wachstumsverlaufes begründet (Anhang 30).

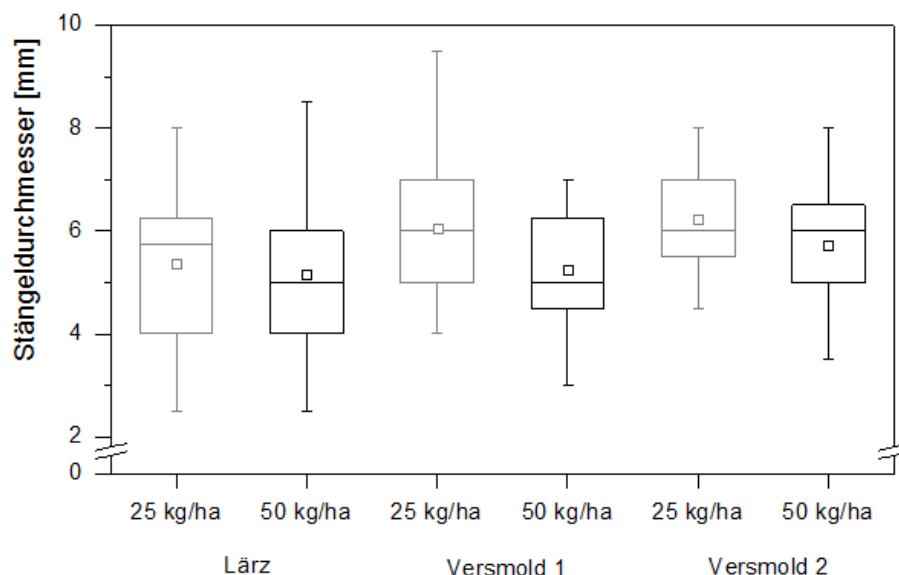
Am Standort Lärz wurden in der niedrigen Aussaatstärke die größten Pflanzhöhen des Winteranbaus 2013/14 mit 131,9 cm erreicht, gefolgt vom Standort Vermold 1 mit 128,2 cm, ebenfalls in der niedrigen Aussaatstärke. Am Standort Vermold 2, der insgesamt die niedrigsten Pflanzhöhen erbrachte, waren dagegen die Pflanzen der hohen Aussaatstärke größer.

**Tabelle 6-2: Pflanzhöhen zum Ende der Blüte, Winteranbau 2013/14**

<i>Probe</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Median</i> <i>[cm]</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>
Lärz, 25 kg/ha	131,9	138,0	17,2	20
Lärz, 50 kg/ha	122,7	128,0	21,8	21
Vermold 1, 25 kg/ha	128,2	125,5	18,5	17
Vermold 1, 50 kg/ha	106,8	109,5	18,3	20
Vermold 2, 25 kg/ha	102,6	101,0	8,8	16
Vermold 2, 50 kg/ha	111,5	113,1	12,2	19

Obwohl sich die Wachstumsverläufe der beiden Aussaatstärken an den Standorten nicht statistisch unterscheiden, ergibt sich bei der Betrachtung der Pflanzenhöhen zum Ende der Blüte an beiden Vermold Standorte signifikante Unterschiede zwischen den beiden Aussaatstärken (Vermold 1:  $p \leq 0,001^{***}$ , Vermold 2:  $p = 0,02^*$ ). In der niedrigen Aussaatstärke weichen die Pflanzenhöhen zwischen den Standorten Lärz und Vermold 2, sowie Vermold 1 und 2 signifikant voneinander ab ( $p \leq 0,001^{***}$ ). In der hohen Aussaatstärke kann nur zwischen den Pflanzenlängen der Standorte Lärz und Vermold 1 ein belegbarer Unterschied ermittelt werden ( $p = 0,016^*$ ) (Anhang 31). Die hohe Variabilität der Pflanzenhöhen spiegelt sich in der hohen Standardabweichung wider (Tabelle 6-2).

Die Stängeldurchmesser wurden an einer Stängelhöhe von 50 cm über dem Boden bestimmt. Diese sind als Box-Whisker-Diagramm in Abbildung 6-13 dargestellt. Die Stängeldurchmesser aller Beprobungen befinden sich im Anhang 32.



**Abbildung 6-13: Box-Whisker-Plot der Stängeldurchmesser zum Ende der Blüte, Winteranbau 2013/14**

Die Spannweiten zwischen den minimalen und maximalen Stängeldurchmessern sind sehr hoch und reichen von 2,5 mm (Lärz, 25 kg/ha) bis 9,5 mm (Vermold 1, 25 kg/ha). Im Trend weisen die Stängel der niedrigen Aussaatstärke auf allen drei Versuchsflächen höhere Durchmesser als die Pflanzenstängel in der hohen Aussaatstärke auf. Dieser Trend kann jedoch für keine Versuchsfläche statistisch belegt werden. Ebenfalls gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Standorten (Anhang 31).

In Abbildung 6-14 ist der Stängeldurchmesser in Bezug zur Pflanzenhöhe von allen Standorten aufgetragen. Dabei zeigt sich, dass bei gleichem Stängeldurchmesser verschiedene Pflanzenhöhen ausgebildet wurden, wodurch die Bestandesinhomogenität noch verstärkt wird. Es besteht eine mittel-starke Korrelation zwischen dem Stängeldurchmesser und der Pflanzenhöhe ( $p \leq 0,001$ ,  $R^2 = 0,312$ ,  $n = 112$ ).

Der Stängeldurchmesser von 5 mm ist bei der Beprobung zum Blühende am häufigsten vertreten und bildete Pflanzen mit Höhen zwischen 82 bis 152,5 cm aus. Am zweithäufigsten wurden Pflanzen mit einem Durchmesser von 6 mm vermessen, die Höhen von 99,5 cm bis 145,5 cm erreichten. Im Bestand bilden Stängeldurchmesser von weniger als 3 mm und mehr als 8,5 mm die Ausnahme.

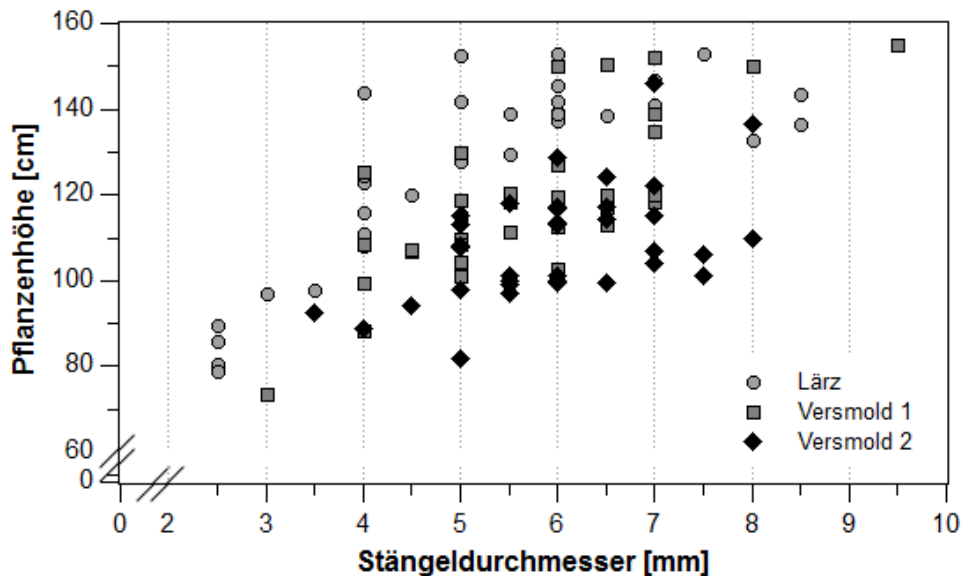


Abbildung 6-14: Korrelation Stängeldurchmesser zur Pflanzenhöhe zum Blühende, Winteranbau 2013/14

Die Wurzellängen zur Beprobung zum Ende der Blüte sind in Abbildung 6-15 präsentiert. Die Wurzellängen aller Beprobungen sind im Anhang 33 tabellarisch aufgelistet. Auf den beiden Versmolder Standorten bildeten die Hanfpflanzen längere Wurzeln aus als am Standort Lärz, die auch eine höhere Standardabweichung aufweisen.

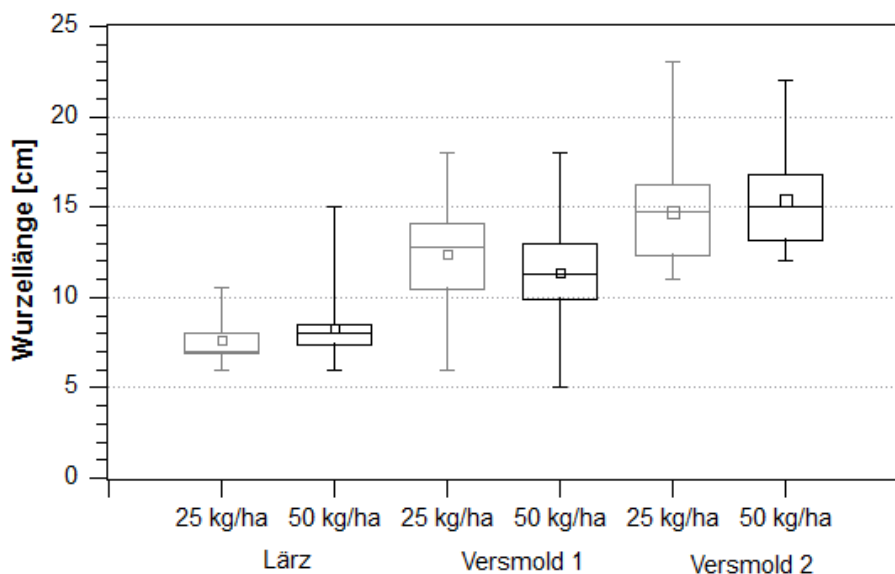
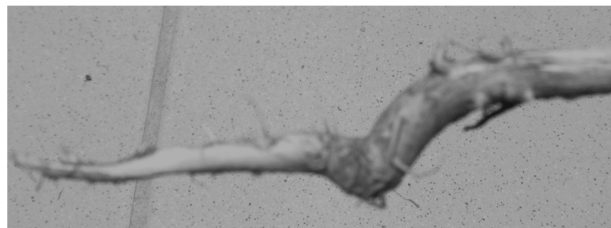


Abbildung 6-15: Box-Whisker-Plot der Wurzellänge zum Ende der Blüte, Winteranbau 2013/14

Die längsten Wurzeln wurden am Standort Versmold 2 vermessen, mit Längen von 14,8 cm in der niedrigen und 15,4 cm in der hohen Aussaatstärke. Zwischen den Aussaatstärken der Standorte können keine signifikanten Unterschiede bestimmt werden. In der niedrigen Aussaatstärke entwickelten die Hanfpflanzen am Standort Versmold mit 7,6 cm signifikant kürzere Wurzeln gegenüber den Standorten Versmold 1 und 2 ( $p \leq 0,001^{***}$ ). In der hohen Aussaatstärke unterscheiden sich alle Standorte signifikant bezüglich ihrer Wurzellänge voneinander ( $p \leq 0,001^{***}$ ) (Anhang 31).

Das Feld am Standort Versmold 1 wurde vor der Aussaat der Hanfpflanzen gewalzt, da der lehmige Boden nach dem Pflügen Schollen geworfen hatte. Fast alle Pflanzen, die zur Bonitur an diesem Standort entnommen wurden, weisen Deformationen an den Wurzeln auf, die wahrscheinlich von der Rückverfestigung des Bodens herrührten (Abbildung 6-16). Trotzdem wurden an diesem Standort längere Wurzeln als auf dem sandigen Standort Lärz ausgebildet. Eine Korrelation zwischen Pflanzenhöhe und Wurzellänge besteht nicht.



**Abbildung 6-16: Wurzeldeformation am Standort Versmold 1, Winteranbau 2013/14**

Da der Hanf laut Literatur einen starken Selbstausdünnungseffekt besitzt, wurde zu dessen Ermittlung der Pflanzenbestand pro Quadratmeter in dreifacher Wiederholung ausgezählt (Tabelle 6-3). Es wurde eine Selbstausdünnungsrate vom Auflaufen der Pflanzen bis zum Ende der Blüte (Hauptwachstumsende) zwischen 1,1 und 5 % ermittelt (Anhang 34). Als Ausnahme tritt der Standort Lärz hervor, auf dem sich die Pflanzenzahl in der hohen Aussaatstärke um 35,5 %, von 186 auf 120 Pflanzen/m<sup>2</sup>, verringerte.

**Tabelle 6-3: Ausdünnungsrate vom Pflanzenauflauf bis zur Ernte, Winteranbau 2013/14**

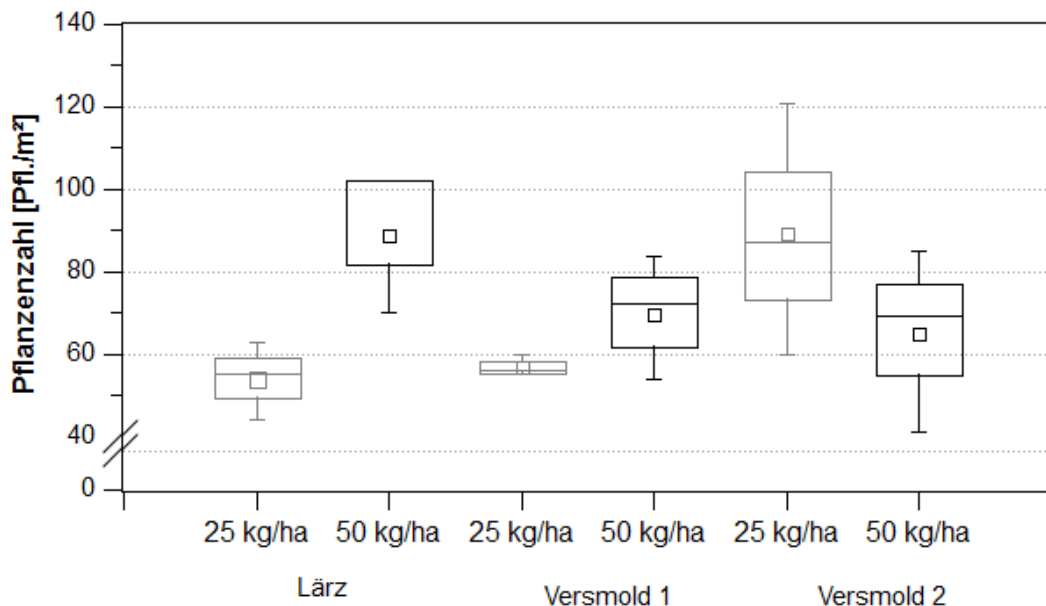
<i>Standort</i>	<i>Aussaatstärke</i>	<i>Pflanzenauflauf</i>	<i>Pflanzen zum Blühende</i>	<i>Pflanzen zur Ernte</i>	<i>Ausdünnung (Auflauf-Blühende)</i>	<i>Ausdünnung (Blühende-Ernte)</i>	<i>Ausdünnung (Auflauf-Ernte)</i>
	[kg/ha]		(Pfl./m <sup>2</sup> )			[%]	
Lärz	25	94	93	54	1,1	41,9	42,5
Lärz	50	186	120	89	35,5	25,8	52,2
Versmold 1	25	80	76	57	5,0	25,0	28,8
Versmold 1	50	190	188	70	1,1	62,8	63,2
Versmold 2	25	140	138	89	1,4	35,5	36,4
Versmold 2	50	304	298	65	2,0	78,2	78,6

Bis zur Ernte im Frühjahr 2014 nahm die Pflanzenzahl weiter ab. Die höchsten Ausdünnungsraten kann an den Standorten Versmold 1 und 2 in der hohen Aussaatstärke vermerkt werden,

bei denen eine Ausdünnung von 62,8 bzw. 78,2 % auftrat. Betrachtet man den gesamten Zeitraum, vom Auflaufen der Pflanzen bis kurz vor der Ernte, sind die Ausdünnungsraten zwischen 63,2 und 78,2% sehr hoch.

Die stärkste Reduktion der Pflanzen pro Quadratmeter hat zwischen Blühende und Ernte stattgefunden. An den Beprobungen zum Wachstumsende/Absterben der Pflanzen im November und nach dem Frost im Januar sind keine Pflanzenzahlen pro Quadratmeter ausgezählt worden. Dadurch kann keine Aussage gemacht werden, ob das Verringern der Pflanzenzahl noch im wachsenden Bestand vor dem Winter oder durch das Absterben und Abknicken während des Winters (evtl. durch Schneelast) stattgefunden hat.

Die Variation der Pflanzenanzahl pro Quadratmeter zur Ernte ist im Abbildung 6-17 durch ein Box-Whisker-Diagramm veranschaulicht. Besonders hoch ist die Streuung am Standort Vermold 2 in der Aussaatstärke 25 kg/ha. Hier wurden pro Quadratmeter zwischen 60 bis 121 Pflanzen ermittelt (Anhang 35). An den beiden Standorten Lärz und Vermold 1 wurden in der höheren Aussaatstärke mehr Pflanzen pro Quadratmeter ausgezählt. Am Standort Vermold 2 wurden dagegen in der niedrigen Aussaatstärke mehr Pflanzen erhoben (Anhang 35). Aufgrund der zu geringen Stichprobenzahl konnte keine statistische Analyse zur Überprüfung der zentralen Tendenzen durchgeführt werden.



**Abbildung 6-17: Box-Whisker Plot der Pflanzenanzahl pro Quadratmeter zur Ernte, Winteranbau 2013/14**

Für die Ermittlung des Ernteertrages pro Hektar konnten nur die Handernten der Quadratmeterschnitte herangezogen werden, da es von den Landwirten leider versäumt wurde, die Flächen getrennt nach Aussaatstärken zu ernten bzw. die geernteten Rundballen nach Aussaatstärke zu markieren. Bei der Berechnung der Erntemengen wurden die Stroherträge (Stängel und Blüten-/Samenreste) pro Quadratmeter verwendet und auf einen Hektar umgerechnet.

Die Werte sollen nur einer groben Einschätzung dienen, da sich die Variation der Stängelzahlen und somit mögliche Fehler bei der Umrechnung potenzieren. Es kann darüber kein repräsentatives Bestandesbild der gesamten Ackerfläche dargestellt werden, da die Quadratmeterflächen nur aus dem mittigen Bestand und nicht auch vom Feldrand ausgewählt wurden. Dies führt möglicherweise zu einer Überschätzung der Ernteerträge.

In Abbildung 6-18 sind die aus den Quadratmeterernten errechneten Hektarerträge für den Hanf im Winteranbau 2013/14 dargestellt. Demnach ergeben sich für den Standort Versmold 2 mit 35,0 dt/ha in der niedrigen und 33,7 dt/ha in der hohen Aussaatstärke die höchsten Erträge. Am Standort Versmold 1 wurden die niedrigsten Hektarerträge ermittelt (niedrige Aussaatstärke: 24,3 dt/ha, hohe Aussaatstärke: 22,4 dt/ha). Nur am Standort Lärz konnte in der hohen Aussaatstärke ein Mehrerertrag erreicht werden, an den beiden Versmolder Standorten wurde in der geringeren Aussaatstärke eine höhere Erntemenge erzielt (Anhang 36).

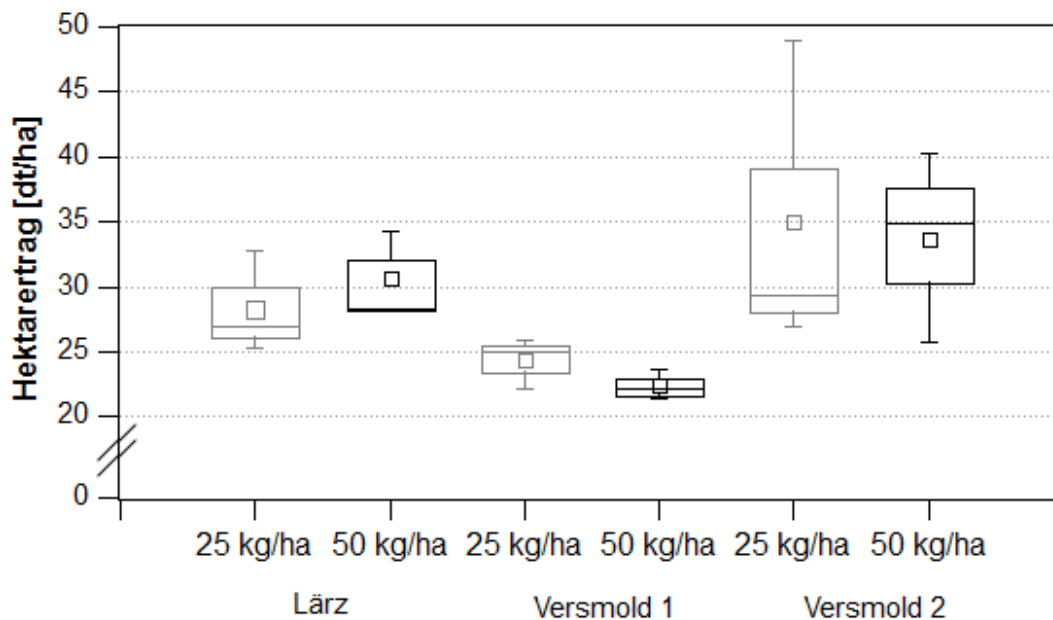


Abbildung 6-18: Box-Whisker-Plot der errechneten Hektarerträge aus den Quadratmeterernten, Winteranbau 2013/14

Der Hanf ist eine einjährige Kulturart und beginnt im Herbst mit der Samenreife abzusterben und seine Blätter abzuwerfen. Dadurch wird dem Boden wieder organisches Material zugeführt.

In Abbildung 6-19 sind die prozentualen Anteile der verschiedenen Pflanzenorgane am Gesamtpflanzengewicht zur Beprobung am Blühende aufgeführt. Die Stängelmasse nimmt den größten Gewichtsanteil der Hanfpflanzen ein, gefolgt von der Blattmasse. Die Blütenmasse bedingt den niedrigsten Anteil und liegt zwischen 2,9 und 5,9 %. Die Wurzelmasse ist auf den beiden Versmolder Standorten höher als am Standort Lärz und spiegelt die Verhältnisse, die auch bei den Wurzellängen gefunden wurden wider (Abbildung 6-15). Zwischen der Wurzellänge und dem Gewichtsanteil der Wurzelmasse besteht eine Korrelation ( $p = 0,018$ ,  $R^2 = 0,788$ ,  $n = 6$ ).

Am Standort Lärz wurde gegenüber den beiden Standorten in Versmold prozentual mehr Stängelmasse gebildet. Am Standort Versmold 1 ist der Stängelanteil an der Gesamtpflanzenmasse in der niedrigen Aussaatstärke höher, wohingegen an den sandigen Standorten Lärz und Versmold 2 in der hohen Aussaatstärke anteilig mehr Stängelmasse wuchs.

Die Korrelation zwischen Pflanzenlänge und Stängelmasse weist ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,783$  auf ( $p = 0,042$ ,  $n = 6$ ). Die Blattmasse verhält sich gegenläufig zur Stängelmasse: je mehr Stängelmasse produziert wurde, desto weniger Blattmasse wurde aufgebaut. Die größten Blattmassenanteile wurden am Standort Versmold 1 in der hohen Aussaatstärke und am Standort Versmold 2 in der niedrigen Aussaatstärke erhoben.

Die Gewichtanteile zu allen Beprobungsterminen sind im Anhang 37 aufgeführt. Im weiteren Vegetationsverlauf nimmt der Anteil der Blütenmasse am Gesamtpflanzengewicht zu (7,8-16,9 %), da bereits ersten Samen gebildet wurden, die ein höheres Gewicht einnehmen. Durch das Absterben und Abfallen der Blätter, vergrößert sich der Stängelanteil. Nach dem Frost und kurz vor der Ernte geht der Anteil der Blüten-/Samenmasse wieder zurück, da restliche Blütenanteile und Samen durch den Reifeprozess und Witterungseinflüsse ausfallen. Zur Beprobung nach dem ersten Frost (Januar 2014) waren die Pflanzenstängel komplett entlaubt, so dass keine Blattmasse mehr bestimmt werden konnte.

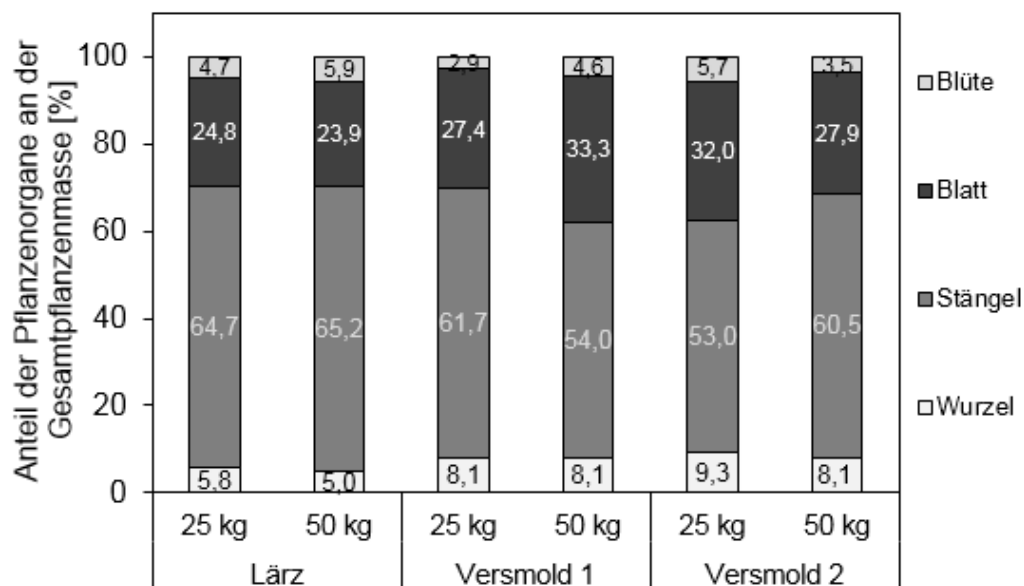


Abbildung 6-19: Prozentuale Anteile der Pflanzenorgane am Gesamtgewicht zur Beprobung am Ende der Blüte, Winteranbau 2013/14

### 6.3.2 Pflanzenanalyse

Die einzelnen Pflanzenorgane (Blüte, Blatt, Stängel, Wurzel) wurden auf ihre Hauptnährstoffe (Stickstoff, Phosphor, Kalium) analysiert, um Aussagen über den Nährstoffbedarf der Hanfpflanzen, sowie die Aufnahme aus dem Boden treffen zu können. Zur Darstellung wurde

die Beprobung zum Ende der Blüte herangezogen, da zu diesem Zeitpunkt die maximale Nährstoffeinlagerung erfolgte. Die Nährstoffgehalte in Prozent sind in Tabelle 6-4 dargestellt, die von allen Probennahmeterminen befinden sich im Anhang 38 bis Anhang 40.

**Tabelle 6-4: Hauptnährstoffgehalte der verschiedenen Pflanzenorgane zum Blühende, Winteranbau 2013/14**

<i>Standort</i>	<i>Aussaat- stärke</i>	<i>Pflanzen- organ</i>	<i>Stickstoffgehalt</i>	<i>Phosphorgehalt</i>	<i>Kaliumgehalt</i>
	<i>[kg/ha]</i>			<i>[%]</i>	
Lärz	25	Blüte	4,09	1,11	2,63
Lärz	25	Blatt	2,62	0,50	2,71
Lärz	25	Stängel	0,77	0,22	1,89
Lärz	25	Wurzel	0,76	0,18	2,65
Lärz	50	Blüte	4,18	1,24	2,58
Lärz	50	Blatt	3,11	0,57	3,87
Lärz	50	Stängel	0,77	0,25	1,76
Lärz	50	Wurzel	0,85	0,20	1,85
Versmold 1	25	Blüte	5,06	0,88	2,57
Versmold 1	25	Blatt	3,84	0,49	3,97
Versmold 1	25	Stängel	1,14	0,21	2,74
Versmold 1	25	Wurzel	1,11	0,25	2,30
Versmold 1	50	Blüte	5,21	0,92	2,60
Versmold 1	50	Blatt	4,11	0,68	2,94
Versmold 1	50	Stängel	0,99	0,25	2,54
Versmold 1	50	Wurzel	0,95	0,17	2,47
Versmold 2	25	Blüte	4,70	0,97	2,58
Versmold 2	25	Blatt	3,06	0,66	3,52
Versmold 2	25	Stängel	0,92	0,28	2,15
Versmold 2	25	Wurzel	0,78	0,21	2,00
Versmold 2	50	Blüte	4,57	1,03	2,71
Versmold 2	50	Blatt	3,15	0,60	3,92
Versmold 2	50	Stängel	1,14	0,40	2,22
Versmold 2	50	Wurzel	0,83	0,31	2,44

In der Blüte wurden prozentual die höchsten Gehalte an Stickstoff und Phosphor bestimmt, da die Pflanze in der generativen Phase zur Samenproduktion viel Energie benötigt. Gefolgt von den Gehalten in den Blättern, die dieses für die Photosynthese benötigen und im Chlorophyll einlagern. Die Stickstoff- und Phosphorgehalte der Stängel und Wurzeln sind ungefähr gleich hoch, jedoch deutlich geringer als die der Blüten und Blätter. Die Stickstoff- und Phosphorgehalten korrelieren miteinander ( $p \leq 0,001$ ,  $R^2 = 0,834$ ,  $n = 24$ ). Kalium ist in allen



Pflanzenteilen relativ gleichmäßig verteilt, da es sich nicht in den Pflanzenzellen direkt, sondern im Zellsaft befindet. Es besteht eine schwache Korrelation zwischen den Stickstoff- und Kaliumgehalten ( $p = 0,015$ ,  $R^2 = 0,239$ ,  $n = 24$ ). Zwischen den Phosphor- und Kaliumgehalten kann keine statistisch belegbare Korrelation nachgewiesen werden.

In der Landwirtschaft ist es wichtig, den Nährstoffbedarf bzw. -entzug für die erwartete Erntemenge zu kennen, um eine zuvor angepasste Düngung durchführen zu können. In Tabelle 6-5 sind die Nährstoffentzüge pro Tonne Strohertrag dargestellt. Die Entzüge wurden aus den Nährstoffgehalten der einzelnen Pflanzenorgane zum Blühende ermittelt und anschließend auf den Stroh- bzw. Stängelertrag umgerechnet. An den Standorten Lärz und Vermold 1 wurden mehr Nährstoffe in der hohen Aussaatstärke entzogen, am Standort Vermold 2 mehr in der niedrigen Aussaatstärke. Insgesamt ist der Nährstoffentzug auf den beiden Vermolder Flächen höher als am Standort Lärz. Pro Tonne Strohertrag und Hektar wurden am Standort Vermold zwischen 30 und 40 kg Stickstoff, zwischen 5 und 8 kg Phosphor und zwischen 45 und 49,5 kg Kalium entzogen. Am Standort Lärz nahmen die Pflanzen pro Tonne Strohertrag zwischen 21 und 23 kg Stickstoff, ca. 5 -6 kg Phosphor und zwischen 34 und 36 kg Kalium auf.

**Tabelle 6-5: Nährstoffentzug pro Tonne Hanfstrohertrag und Hektar, Winteranbau 2013/14**

<i>Nährstoffentzug pro Tonne Strohertrag und Hektar</i>				
<i>Standort</i>		<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>
<i>[kg/t Ertrag*ha]</i>				
Lärz	25 kg/ha	21,4	5,1	33,6
Lärz	50 kg/ha	23,5	5,8	35,6
Vermold 1	25 kg/ha	32,3	5,0	49,2
Vermold 1	50 kg/ha	41,1	7,7	49,5
Vermold 2	25 kg/ha	34,0	8,1	49,1
Vermold 2	50 kg/ha	29,7	7,7	45,2

Die Nährstoffentzüge der Pflanzen über die berechneten Erträge (Abbildung 6-18) werden möglicherweise aufgrund der geringen Bezugsfläche von einem Quadratmeter und der Beprobung aus der Feldmitte, überschätzt (Tabelle 6-6). Am Standort Lärz, der die niedrigsten Nährstoffgehalte im Boden aufwies, wurden auch die geringsten Nährstoffmengen durch die Pflanzen aufgenommen. Am Standort Vermold 2, der die höchsten Erträge hervorbrachte, wurden am meisten Nährstoffe durch die Pflanzen entzogen. Obwohl im Boden am Standort Vermold 1 die höchsten  $\text{NO}_3\text{-N}$ - und  $\text{P}_{\text{DL}}$ -Gehalte zur Aussaat bestimmt wurden, wurden hier die niedrigsten Hektarerträge bestimmt. Die Pflanzen konnten die hohen Nährstoffgehalte nicht verwerten, möglicherweise durch zu geringe Wassergehalte im Boden (Kapitel 6.2).

**Tabelle 6-6: Mittlere, minimale und maximale Nährstoffzüge durch die Pflanzen, berechnet über die Hektarerträge, Winteranbau 2013/14**

Standort	Aussaat- stärke [kg/ha]	N			P			K		
		[kg/ha]								
		M	Min	Max	M	Min	Max	M	Min	Max
Lärz	25	60,9	54,4	70,4	14,5	13,0	16,8	95,3	85,2	110,3
Lärz	50	72,2	66,2	84,0	17,9	16,4	20,8	109,3	100,2	127,2
Versmold 1	25	78,6	71,7	83,6	12,2	11,1	13,0	119,8	109,2	127,4
Versmold 1	50	92,0	87,4	97,7	17,2	16,4	18,3	110,8	105,2	117,6
Versmold 2	25	119,2	91,5	166,4	28,5	21,9	39,8	172,0	132,0	240,1
Versmold 2	50	100,1	76,7	119,8	26,1	20,0	31,2	152,0	116,6	182,0

Den Nährstoffzügen durch die Pflanzen wurden die Nährstoffänderungen im Boden von der Aussaat bis zum maximalen Pflanzenwachstum gegenübergestellt. Dieser Bezugspunkt wurde gewählt, da zu einem späteren Zeitpunkt bereits die Hanfblätter durch das Absterben der Pflanzen zu Boden fallen, welches einen erneuten Eintrag von organischen Material bedeutet. Der Zeitpunkt zur Ernte kann für die Berechnung ebenfalls nicht herangezogen werden, da über den Winter möglicherweise Nährstoffe mineralisiert werden.

In Tabelle 6-7 sind die Nährstoffänderungen im Boden zur Beprobung am Wachstumsende zusammengefasst. Zu diesem Zeitpunkt war die Nährstoffaufnahme der Pflanzen beendet und dem Boden wurde noch keine organische Substanz durch das Absterben und Abfallen der Blätter zugeführt. Als Bezugspunkt dienen die Bodennährstoffgehalte zur Aussaat. Über den Pflanzenentzug wurde der Soll-Nährstoffgehalt berechnet und mit dem Ist-Nährstoffgehalt im Boden zur Beprobung am Wachstumsende verglichen, woraus sich die Bilanz ergibt. Positive Bilanzen (=Nährstoffzunahmen im Boden) sind in einem helleren Grauton dargestellt. Negative Bilanzen ergeben eine Nährstoffabnahme im Boden. Für die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte ergeben sich für die sandigen Standorte eine Zunahme, am lehmigen Standort Versmold 1, der die höchsten  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte zur Aussaat aufwies, kann eine Abnahme über den Nährstoffentzug der Pflanzen hinaus verzeichnet werden. Die Bilanz des  $\text{P}_{\text{DL}}$ -Gehaltes im Boden ist für den Standort Lärz in der niedrigen Aussaatstärke und für den Standort Versmold 1 in der hohen Aussaatstärke positiv, wobei die Zunahme des Gehalts am lehmigen Standort Versmold 1 höher war. Bis auf den Standort Versmold 1 in der niedrigen Aussaatstärke können für die  $\text{K}_{\text{DL}}$ -Gehalte im Boden nur positive Bilanzen bestimmt werden.

Tabelle 6-7: Nährstoffbilanzen zum Wachstumsende, Winteranbau 2013/14

Standort	Aussaatsstärke	Bodennährstoffgehalt zur Aussaat	Pflanzenentzug	Bodennährstoffgehalt errechnet aus Pflanzenentzug [Soll]	Bodennährstoffgehalt zum Wachstumsende [Ist]	Bilanz
	[kg/ha]	$NO_3-N$ [kg/ha*90 cm Bodentiefe]				
Lärz	25	72,8	60,9	11,9	83,6	+71,7
Lärz	50	72,8	72,2	0,6	19,1	+18,5
Versmold 1	25	320,9	78,6	242,3	94,8	-147,5
Versmold 1	50	320,9	92,2	228,7	180,4	-48,3
Versmold 2	25	155,0	119,2	35,8	119,2	+83,4
Versmold 2	50	155,0	100,1	54,9	70,0	+15,1
$P_{DL}$ [kg/ha*30cm Bodentiefe]						
Lärz	25	347,4	14,5	332,9	384,4	+51,5
Lärz	50	347,4	17,9	329,5	328,3	-1,2
Versmold 1	25	657,6	12,2	645,4	630,2	-15,2
Versmold 1	50	657,6	17,2	640,4	842,0	+201,6
Versmold 2	25	671,6	28,5	643,1	574,0	-69,1
Versmold 2	50	671,6	26,1	645,5	584,3	-61,2
$K_{DL}$ [kg/ha*30 cm Bodentiefe]						
Lärz	25	417,2	95,3	321,9	340,6	+18,7
Lärz	50	417,2	109,3	307,9	332,0	+24,1
Versmold 1	25	1107,5	119,8	987,7	917,9	-69,8
Versmold 1	50	1104,7	110,8	993,9	1083,4	+89,5
Versmold 2	25	450,1	172,0	278,1	434,2	+156,1
Versmold 2	50	450,1	152,0	298,1	555,7	+257,6

### 6.3.3 Faserqualität

Die Faserqualität umschreibt die morphologischen und mechanischen Eigenschaften der Fasern. Folgende Parameter wurden untersucht: Fasergehalt, Faserbreite, Zugfestigkeit, Zugmodul und Bruchdehnung.

Als Faseranteil wird der prozentuale Anteil der Fasern an der gerösteten Gesamtstängelmasse beschrieben. Der Faseranteil nach dem Brechen, Auflösen und Entfernen des Schäbenanteils der unterschiedlichen Aussaatstärken wird in Tabelle 6-8 gezeigt. Für den Standort Lärz ergibt sich in der geringeren Aussaatstärke ein höherer Fasergehalt. An den beiden Versmolder Standorten konnte dagegen in der höheren Aussaatstärke auch ein höherer Fasergehalt bestimmt werden. Mit 16,9 % wurde am Standort Versmold 1 in der niedrigen Aussaatstärke der geringste Fasergehalt des Winteranbaus 2013/14 ermittelt. Den höchsten Fasergehalt mit 47,9 % brachten die Hanfpflanzen der hohen Aussaatstärke am Standort Versmold 2 hervor.

Tabelle 6-8: Fasermasseanteil an der Gesamtpflanzenmasse, Winteranbau 2013/14

	Aussaatstärke [kg/ha]	Fasergehalt [%]
Lärz	25	41,0
Lärz	50	36,0
Versmold 1	25	16,9
Versmold 1	50	30,4
Versmold 2	25	27,0
Versmold 2	50	47,9

Die Mittelwerte der Faserbreiten der Standorte und verschiedenen Aussaatstärke liegen eng beieinander und auch die Darstellung als Box-Whisker-Diagramm (Abbildung 6-20) zeigt visuell kaum Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten. Die statistische Auswertung ergibt jedoch signifikante Unterschiede zwischen der niedrigen und hohen Aussaatstärke der Standorte Lärz ( $p = 0,027^*$ ) und Versmold 1 ( $p = 0,008^{**}$ ). In der niedrigen Aussaatstärke bildeten die Hanfstängel am Standort Lärz geringere Faserbreiten als an den Standorten Versmold 1 und 2 aus ( $p \leq 0,001^{***}$ ). In der hohen Aussaatstärke ergeben sich zwischen allen Standorten signifikante Unterschiede (Anhang 41).

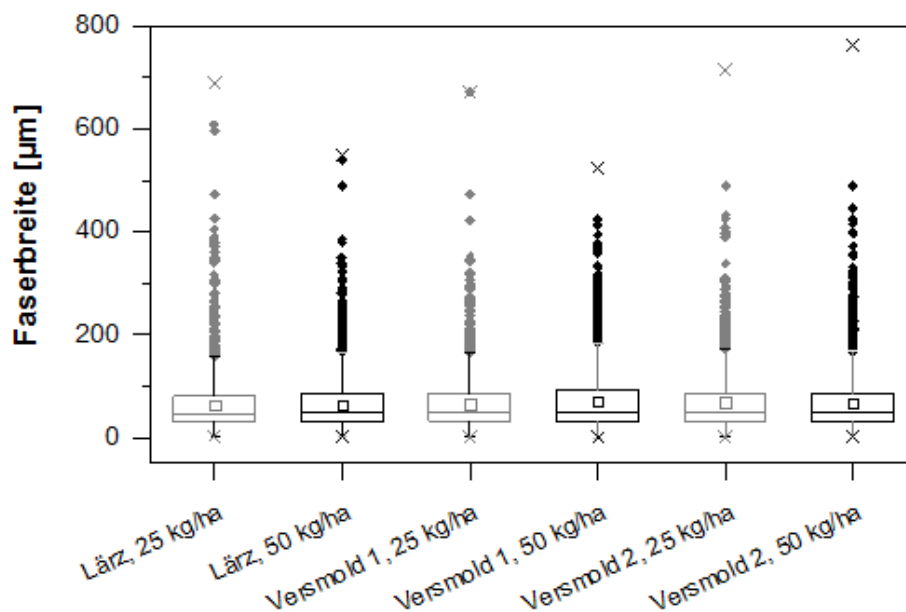


Abbildung 6-20: Box-Whisker-Plot der Faserbreite, Winteranbau 2013/14 (Whisker = 1,5-facher IQR, Routen = Ausreißer, Kreuze = Min- und Max-Werte)

Die Zugfestigkeit der Fasern beschreibt mittlere Werte zwischen 148,7 und 402,2 MPa, mit sehr hohen Standardabweichungen (Abbildung 6-21). Die höchste Zugfestigkeit erreichen die Fasern des Standortes Lärz in der niedrigen Aussaatstärke mit 402,2 MPa. Auf den beiden Versmolder Standorten konnte jeweils in der niedrigeren Aussaatstärke auch die geringere Zugfestigkeit ermittelt werden, wobei nur der Unterschied am Standort Versmold 1 signifikant ist ( $p \leq 0,001^{***}$ ). Für die Standorte Lärz und Versmold 2 besteht kein statistischer Unterschied in Bezug auf die Aussaatstärke. In der niedrigen Aussaatstärke brachten die Standorte signifikant unterschiedliche Zugfestigkeiten hervor.

In der hohen Aussaatstärke bestätigen sich signifikante Unterschiede bezüglich der Zugfestigkeit zwischen den Standorten Lärz und Versmold 2, sowie den Standorten Versmold 1 und 2. Die Zugfestigkeiten am Standort Lärz und Versmold 1 unterscheiden sich in der hohen Aussaatstärke nicht voneinander (Anhang 41).

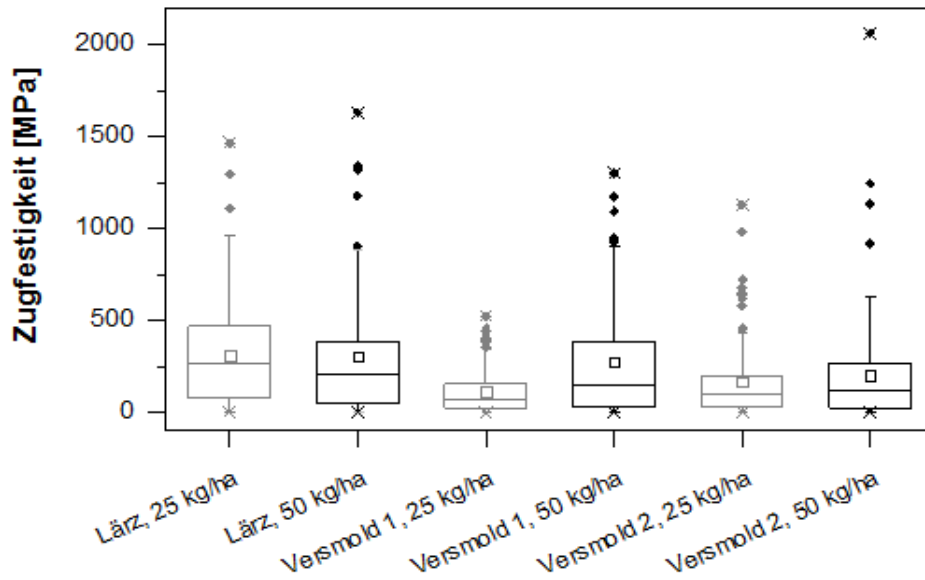


Abbildung 6-21: Box-Whisker-Plot der Zugfestigkeit, Winteranbau 2013/14 (Whisker = 1,5-facher IQR, Routen = Ausreißer, Kreuze = Min- und Max-Werte)

Für den Zugmodul kann zwischen den Aussaatstärken und Standorten kein eindeutiger Trend ermittelt werden (Abbildung 6-22). Im Mittel liegen die Werte zwischen 8289,9 MPa und 16538,5 MPa. Beide Werte wurden für den Standort Versmold 1 bestimmt, wobei die Aussaatstärke von 25 kg/ha auch den geringeren Zugmodul generierte.

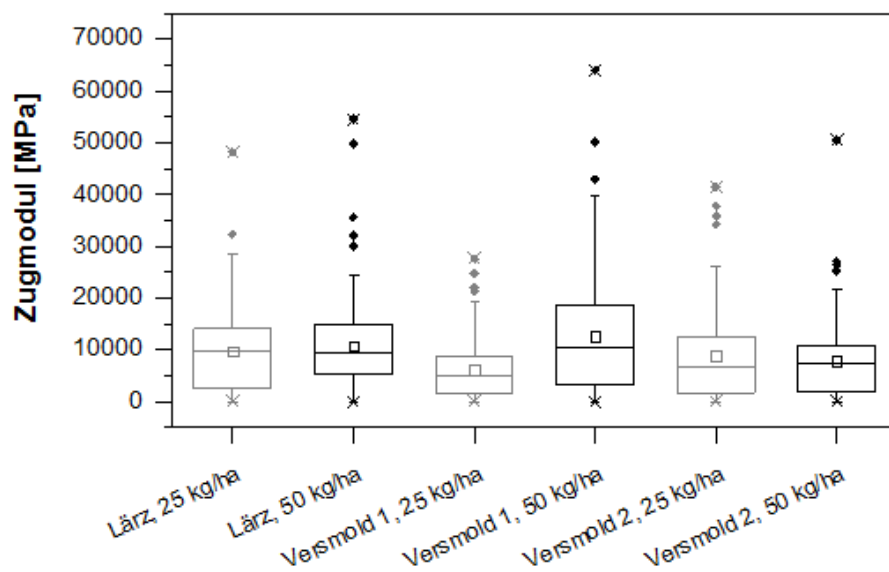


Abbildung 6-22: Box-Whisker-Plot des Zugmoduls, Winteranbau 2013/14 (Whisker = 1,5-facher IQR, Routen = Ausreißer, Kreuze = Min- und Max-Werte)

Dies Unterschiede zwischen der niedrigen und hohen Aussaatstärke am Standort Versmold 1 und 2 sind signifikant ( $p \leq 0,001^{***}$ ). Des Weiteren weichen die Zugmodule der niedrigen Aussaatstärke aller Standorte signifikant voneinander ab. In der hohen Aussaatstärke konnten signifikante Unterschiede in den Zugmodulen der Standorte Lärz und Versmold 2, sowie zwischen Versmold 1 und 2 bestimmt werden (Anhang 41).

Abbildung 6-23 veranschaulicht die Bruchdehnung der Hanffasern als Box-Whisker-Plot. Die Bruchdehnung der Fasern beider Aussaatstärken am Standort Lärz ist signifikant höher als die beider Aussaatstärken an den Standorten Versmold 1 und 2. Im Trend bringen die Fasern der niedrigen Aussaatstärken an beiden Versmolder Standorten geringere Bruchdehnungen hervor, wohingegen die Fasern vom Standort Lärz in der niedrigeren Aussaatstärke eine größere Bruchdehnungen zeigen. Für die Standorte Lärz ( $p \leq 0,001^{***}$ ) und Versmold 2 ( $p = 0,038^*$ ) konnte dieser Trend statistisch belegt werden (Anhang 41).

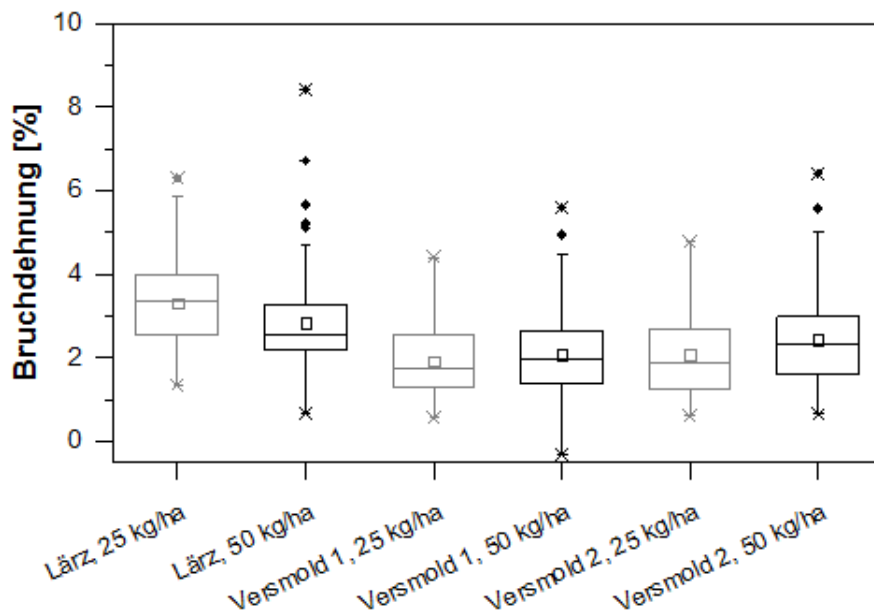


Abbildung 6-23: Box-Whisker-Plot der Bruchdehnung, Winteranbau 2013/14 (Whisker = 1,5-facher IQR, Routen = Ausreißer, Kreuze = Min- und Max-Werte)

### 6.3.4 Faserweiterverarbeitung

Die Fasern des Winteranbaus 2013/14 wurden nach der Faseraufbereitung zwecks Herstellung vergleichbarer Halbzeuge an die Firma Polyvlies Franz Beyer GmbH geliefert. Die Halbzeuge wurden nach dem thermoplastischen Formpressverfahren unter realen Bedingungen mit serientauglichen Betriebsmitteln bei einem Systemlieferanten der Automobilindustrie zu einer Türseitenverkleidung im Fahrzeuginterieur eines Automobilherstellers weiterverarbeitet. Der so entstandene Naturfaserverbundwerkstoff aus den Fasern des Winteranbaus 2013/14 wurde in sämtlichen Verprobungsphasen sowie Fertigungsstufen den einschlägigen Prüfungen unterzogen und die Ergebnisse einem konventionellem Vergleichsprodukt aus Flachs mit demselben Hybridpartner aus Polypropylen gegenübergestellt (Anhang 42 bis Anhang 46). Daraus ergab sich, dass das Produkt aus Fasern des Winteranbaus in allen für die

Anwendung relevanten Disziplinen in einem akzeptablen Toleranzbereich dem bereits arri-  
vierten Serienprodukt aus Flachs entspricht. Gegenüber den konventionellen Hanffasern aus  
dem Sommeranbau ist ein solistischer Einsatz der Fasern des Winteranbaus, unter Vorbehalt  
einer Reproduzierbarkeit der Faserqualität des Anbaus 2013/14, in der Weiterverarbeitung zu  
Türverkleidungen o.ä. möglich. Das Verhalten während des Formpressens sowie die Prüfung  
anhand von optischer und haptischer Merkmale des Formpressteils aus den Fasern des Win-  
teranbaus ergaben beim Automobilhersteller eine positive Resonanz.

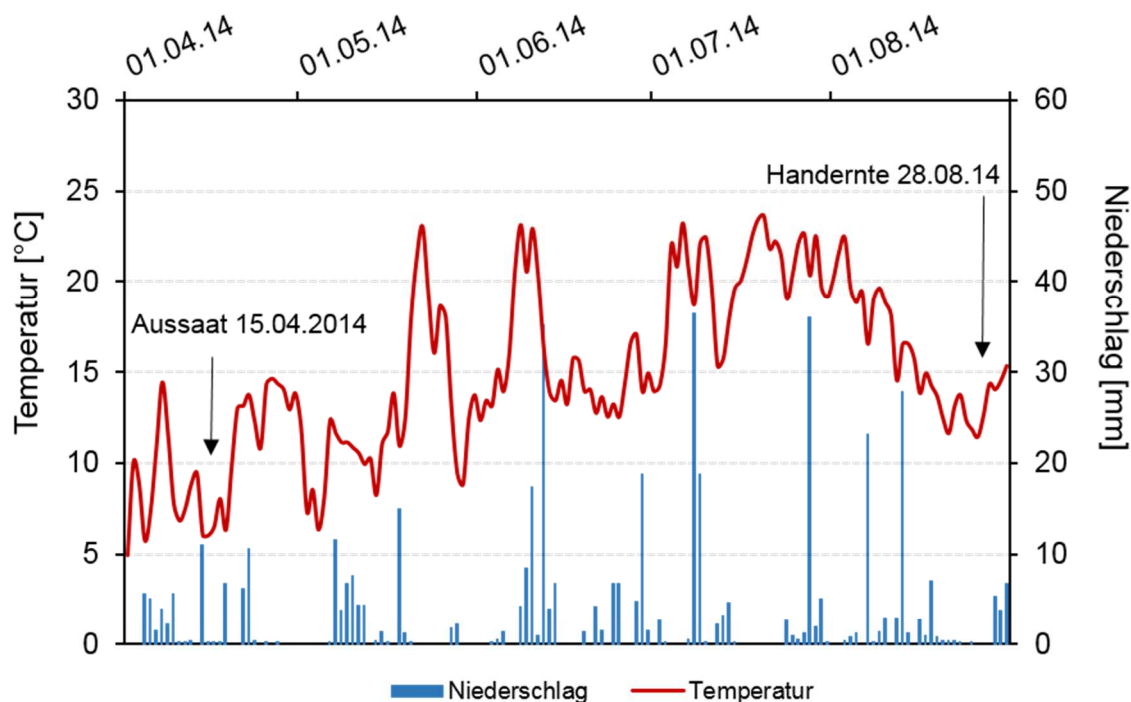
#### **6.4 Zusammenfassung Winteranbau 2013/14**

Im Winteranbau 2013/14 konnte für die Standorte Lärz und Vermold eine Temperatursumme  
von 1100,4°C bzw. 1115,6°C ermittelt werden. Am Standort Lärz standen den Pflanzen mit  
einer Niederschlagssumme von 227,4 mm signifikant mehr Wasser zum Wachstum zum Ver-  
fügung als am Standort Vermold, der eine Niederschlagssumme von 119,8 mm aufwies.  
Aufgrund unterschiedlicher Düngemittel und Bodenvorräten weichen die NO<sub>3</sub>-N-Gehalte  
voneinander ab. Am Standort Lärz wurden 60 kg NO<sub>3</sub>-N/ha in den oberen 30 cm Boden be-  
stimmt. Daraus entwickelten sich am Standort Lärz signifikant höhere Pflanzen als am Stand-  
ort Vermold. Am Standort Vermold 1 wurden im lehmigen Boden 240 kg NO<sub>3</sub>-N/ha nach-  
gewiesen, der in der niederen Aussaatstärke höhere Pflanzen hervorbrachte als in der hohen  
Aussaatstärke. Am sandigen Standort Vermold 2 stand den Hanfpflanzen 110 kg NO<sub>3</sub>-N/ha  
zur Verfügung. Die höhere Aussaatstärke brachte zwar höhere Pflanzen hervor, jedoch konnte  
dieser Unterschied nicht statistisch belegt werden. Die höchsten Nährstoffgehalte wiesen die  
Pflanzen am Standort Vermold 1 auf, denen auch die meisten Nährstoffe im Boden zur Ver-  
fügung standen. Die größten Erträge wurde am der Standort Vermold 2 erzielt, wobei es  
keinen statistischen Unterschied zwischen den beiden Aussaatstärken gibt. Danach folgte der  
Standort Lärz, auf dem die höhere Aussaatstärke auch einen größeren Ertrag erbrachte. Am  
wenigsten wurde auf dem lehmigen Standort Vermold 1 geerntet, wobei die höheren Erträge  
aus der niedrigeren Aussaatstärke kamen. Zwischen der Erntemenge, der Pflanzenanzahl, so-  
wie der Pflanzenhöhe besteht keine Korrelation. Bezüglich der Faserqualitäten können für  
den Winteranbau 2013/14 keine eindeutigen Trends aufgrund der Aussaatstärke beschrieben  
werden. Die Faserbündelbreiten weisen signifikante Unterschiede zwischen der niedrigen und  
hohen Aussaatstärke an den Standorten Lärz und Vermold 2 auf. Die Zugfestigkeit zeigt am  
Standort Lärz höhere Werte in der geringen Aussaatstärke, wohingegen an den Vermolder  
Standorten höhere Zugfestigkeiten in der höheren Saatstärke erreicht wurden. Der Zugmodul  
wurde an den Standorten Lärz und Vermold 2 nicht von der Aussaatstärke beeinflusst. Am  
Standort Vermold 1 ist der Zugmodul in der niedrigen Aussaatstärke signifikant geringer als  
in der hohen Aussaatstärke. Die niedrige Aussaatstärke am Standort Lärz weist eine signifi-  
kant höhere Bruchdehnung als in der hohen Aussaatstärke auf. An den Standorten Vermold 1  
und 2 wurde die Bruchdehnung dagegen nicht durch die Aussaatstärke beeinflusst.

## 7 Ergebnisse Sommeranbau 2014

### 7.1 Wetterdaten Sommeranbau 2014

Der Verlauf der Tagesmittelwerte und der Tagesniederschlagssummen für den Sommeranbau des Standortes Lärz ist in Abbildung 7-1 dargestellt. Die Aussaat fand am 15.04.2014 statt, in einer Phase mit kühleren Temperaturen. Gegen Ende April steigen die Temperaturen auf Tagesmittelwerte bis zu 14°C an. Der Jugendentwicklung des Hanfes standen vom 26.04. bis 05.05.2014 keine Niederschläge zur Verfügung. Von Mitte Juni bis Ende Juli treten drei Starkregenereignisse mit Niederschlagsmengen über 30 mm pro Tag auf. Im Temperaturverlauf zeigen sich mehrere wärmere Phasen, die ungefähr mit den Starkregenereignissen zusammenfielen. Für die weitere Analyse der Hanfpflanzen wurden fünf Parzellen mit je ein Quadratmeter Größe am 28.08.2014 mit der Hand geerntet. Die komplette Feldernte erfolgte zu einem späteren Zeitpunkt.

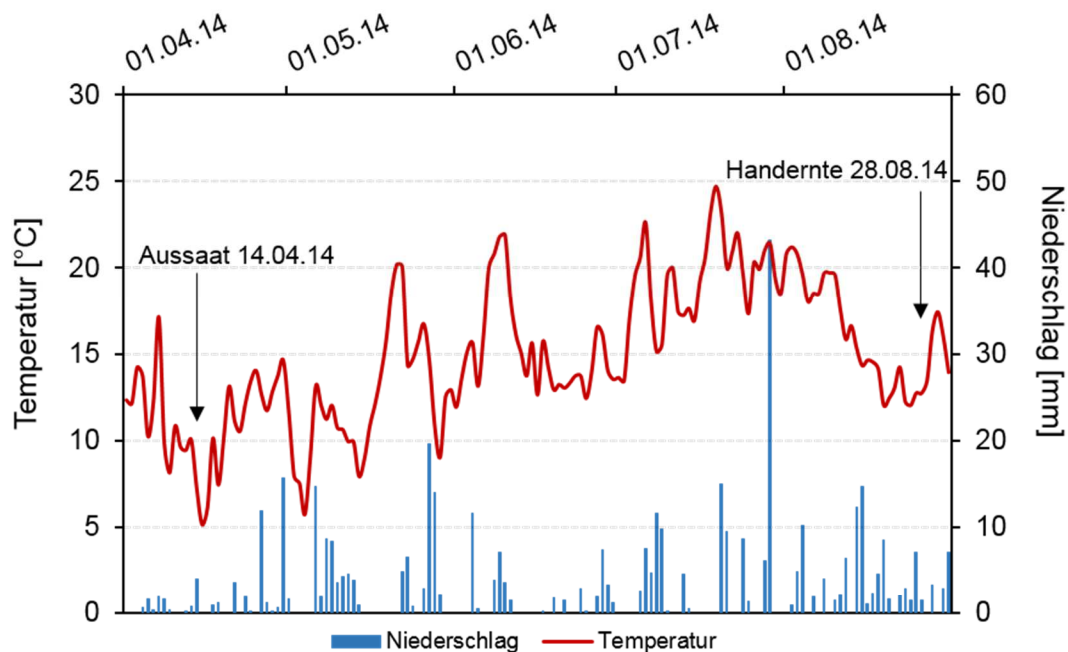


	<i>Apr 14</i>	<i>Mai 14</i>	<i>Jun 14</i>	<i>Jul 14</i>	<i>Aug 14</i>
Monatsmitteltemperatur [°C]	10,1	12,5	15,4	20,1	15,8
Niederschlagssumme [mm]	60,8	61,2	125,2	117,6	91,4
Anzahl Regentage	19	15	18	18	22

Abbildung 7-1: Wetterdaten Lärz, Sommeranbau 2014



Abbildung 7-2 zeigt die täglichen Temperaturmittelwerte und Niederschlagssummen des Standortes Vermold. Der Hanf wurde hier am 14.04.2014 gedrillt. Der Aussaatzeitpunkt liegt in einer sehr kühlen Phase im April, an dem die Tagesmittelwerte von ca. 10°C auf 5°C abfielen. Im April wurde am Standort Vermold mit 48,4 mm eine deutlich geringere Niederschlagsmenge aufgefangen als am Standort Lärz. Im Mai, wenn die Hanfpflanzen von der Jugendentwicklung in die Phase des schnellen Wachstums übergehen, konnten am Standort Vermold 100,8 mm Niederschlag gegenüber 61,2 mm am Standort Lärz verzeichnet werden. Zwischen den Temperaturen und Niederschlagssummen der beiden Standorte gibt es über den gesamten Anbauzeitraum keine statistischen Unterschiede (Anhang 47). Auch bei der monatsweisen Betrachtung unterscheiden sich die Standorte in Bezug auf Temperatur und Niederschlag nicht voneinander. Obwohl die Niederschlagsmengen am Standort Vermold im Juni mit 47,7 mm deutlich geringer sind als am Standort Lärz (125,2 mm), konnte dieser Unterschied nicht statistisch belegt werden (Anhang 47).



	Apr 14	Mai 14	Jun 14	Jul 14	Aug 14
Monatsmitteltemperatur [°C]	11,2	12,3	15,2	19,2	16,0
Niederschlagssumme [mm]	48,4	100,8	47,7	124,7	104,4
Anzahl Regentage	18	17	13	13	23

**Abbildung 7-2: Wetterdaten Vermold, Sommeranbau 2014**

Abbildung 7-3 veranschaulicht die Monatsmitteltemperaturen, sowie die monatlichen Niederschlagssummen, vor dem Verlauf der langjährigen Mittel des Zeitraums 1981-2010. Im oberen Diagramm sind die Werte des Standortes Lärz (a) aufgetragen, in dem darunterliegenden die des Standortes Vermold (b). Die Niederschlagssummen für den Sommeranbau 2014 sind am Standort Lärz signifikant höher als die des langjährigen Mittels ( $p = 0,032^*$ ). In den

Monaten Juni und Juli konnten doppelt so hohe Niederschlagsmengen verzeichnet werden. Die Monatsmitteltemperaturen für den Sommeranbau 2014 sind in den Monaten April und August für beide Standorte etwas geringer als im langjährigen Mittel. Am Standort Vermold fiel in den Monaten Mai, Juli und August im Sommeranbau 2014 deutlich mehr Regen als im langjährigen Mittel. Im Juni wurde dagegen deutlich weniger Niederschlag aufgefangen. Die Unterschiede können nicht statistisch belegt werden, ebenso wenig zwischen der Anzahl der Regentage zwischen den beiden Standorten (Anhang 47).

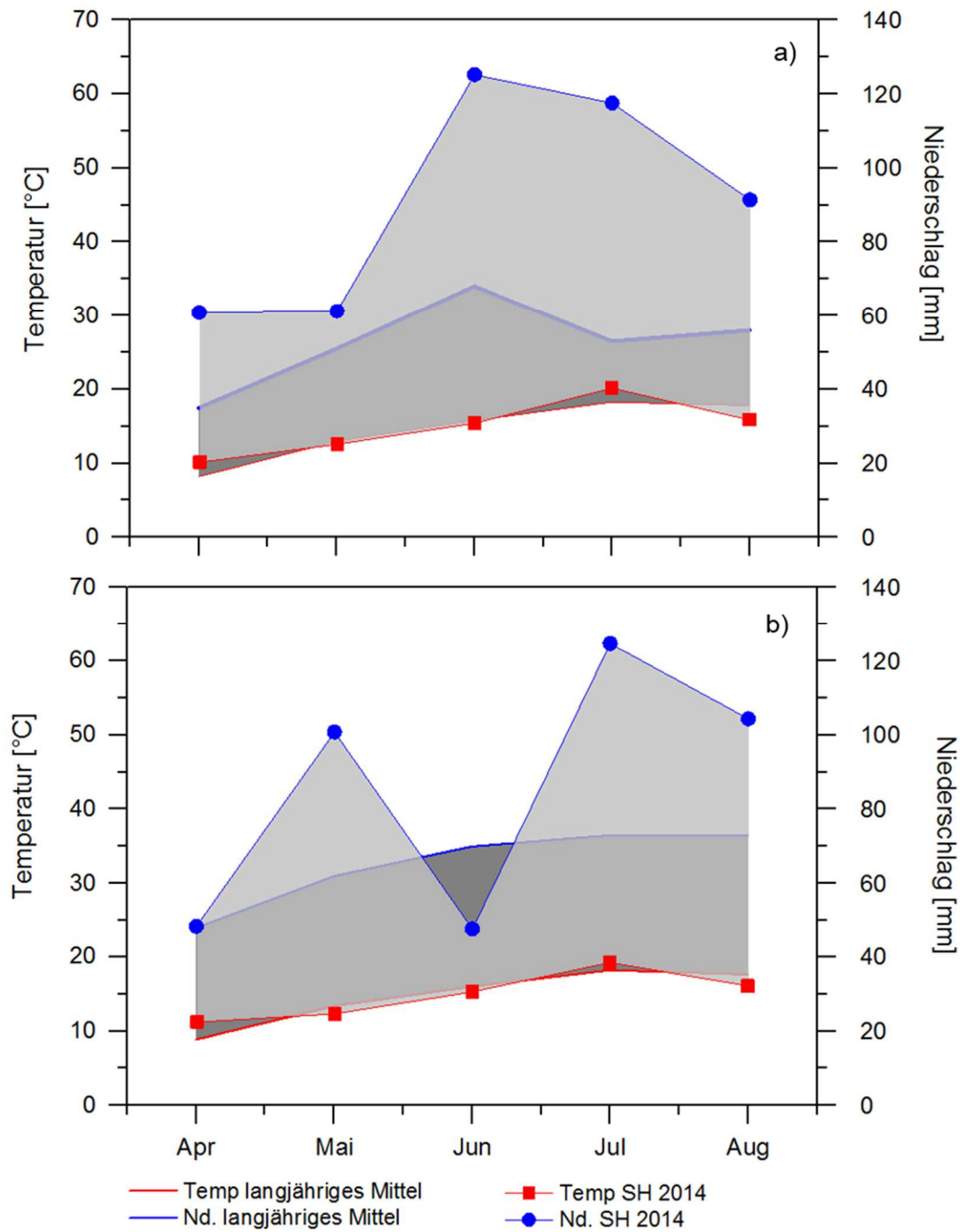
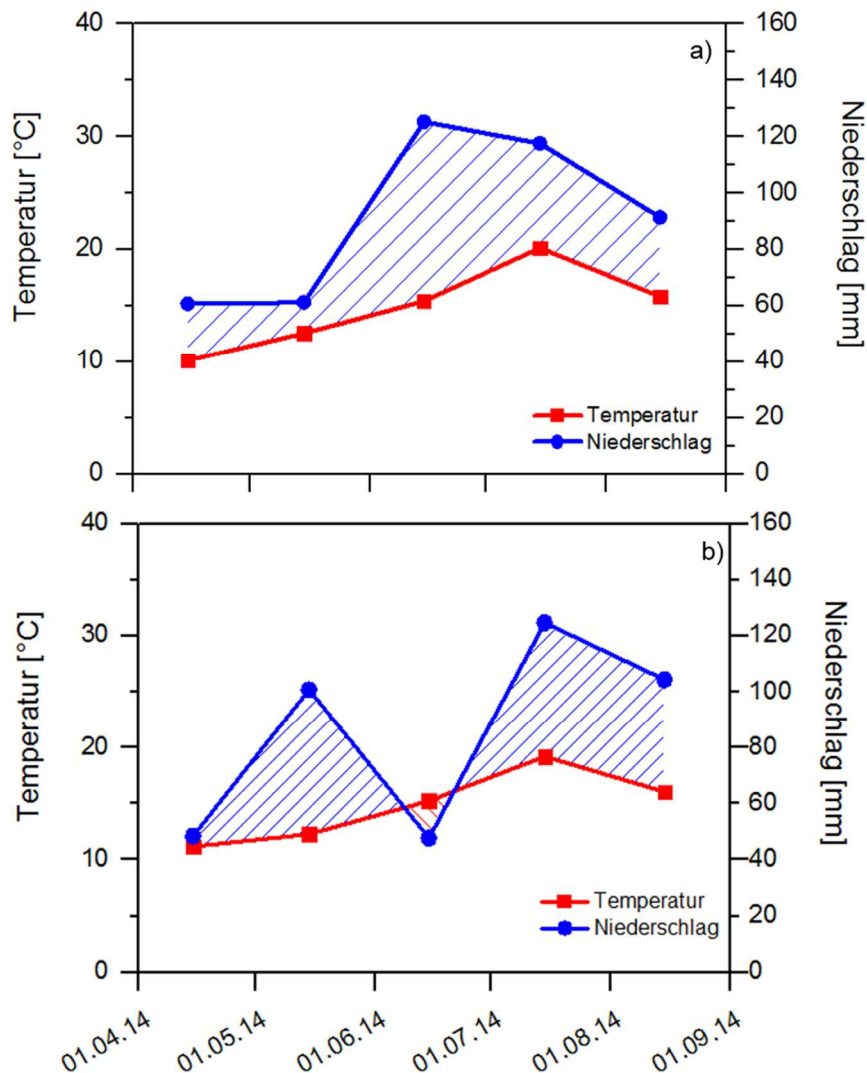


Abbildung 7-3: Vergleich langjähriges Mittel zu Wetterdaten des Sommeranbaus 2014, Standorte Lärz (a) und Vermold (b)

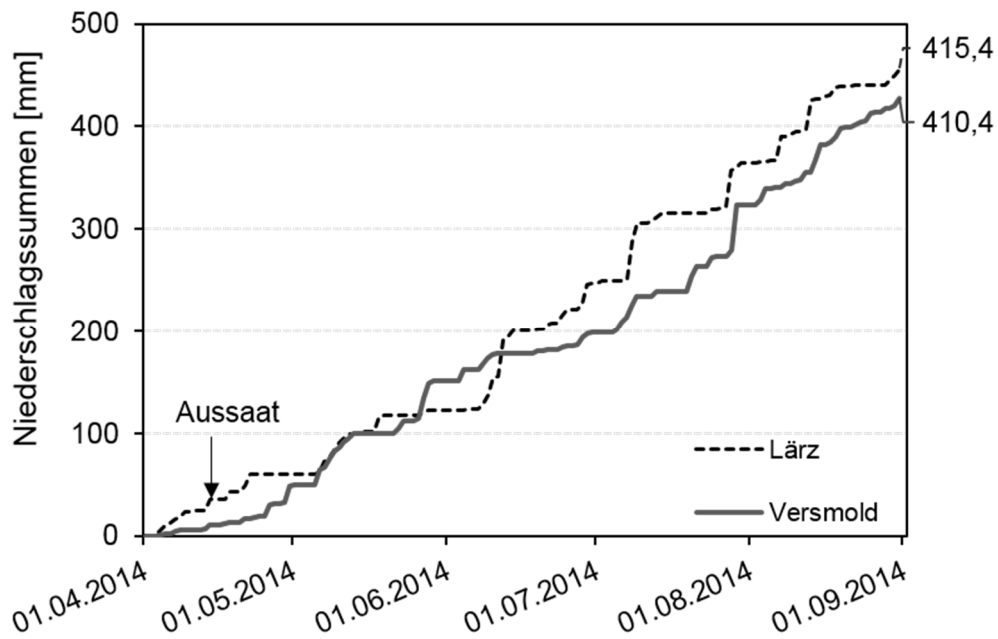
Zur Übersicht der Wasserverfügbarkeit für die Hanfpflanzen wird auch für den Sommeranbau die Darstellung mit einem Temperatur- zu Niederschlagsverhältnis von 1:4 nach Heyland (1991) herangezogen (Abbildung 7-4). Für den Standort Lärz waren über die gesamte Anbauphase hinweg ausreichend Niederschläge vorhanden. Am Standort Versmold ergab sich für den Monat Juni ein möglicher Wasserstress für die Hanfpflanzen, während in den übrigen Monaten genügend Wasser zur Verfügung stand.



**Abbildung 7-4: Wasserverfügbarkeit nach Heyland für die Standorte Lärz (a) und Versmold (b), Sommeranbau 2014**

Die Niederschlagssummen von der Aussaat bis zur Ernte sind in Abbildung 7-5 aufgetragen. Am Aussaatag (14./15. April 2014) konnten am Standort Lärz mit 4 mm mehr Niederschläge verzeichnet werden als am Standort Versmold mit 0,2 mm. Auch eine Woche vor der Aussaat fiel am Standort Lärz mit 19,6 mm eine höhere Niederschlagsmenge als am Standort Versmold mit 4,8 mm. Dieses Bild setzt sich auch eine Woche nach der Aussaat fort. Am Standort Lärz regnete es 24 mm, am Standort Versmold nur 5,5 mm (Anhang 48).

Die Niederschlagssummenkurve des Standortes Versmold steigt aufgrund der hohen Niederschläge im Mai mit 100,8 mm gegen Ende Mai bis Mitte Juni über die des Standortes Lärz. Ab Mitte Juni bis zur Handernte Ende August, wechselt das Verhältnis wieder; die Niederschlagssummen am Standort Lärz übersteigen die des Standortes Versmold, wonach sich beide Summenkurven ab Anfang August wieder annähern. Über den Zeitraum von der Aussaat bis zur Handernte der Hanfpflanzen am 28.08.2014 fielen auf beiden Standorten vergleichbare Niederschlagsmengen; am Standort Lärz 415,4 mm und am Standort Versmold 410,4 mm. Zwischen den Verläufen der Niederschlagssummen besteht kein signifikanter Unterschied.



**Abbildung 7-5: Niederschlagssummenkurven der beiden Versuchsstandorte, Sommeranbau 2014**

Die hohe Variabilität der einzelnen Niederschlagsereignisse kann durch die Niederschlagssummen sowie den monatlichen Niederschlagsmengen nicht verdeutlicht werden. Im Anhang 49 sind die täglichen Niederschlagsmengen der beiden Standorte als Box-Whisker-Diagramm aufgetragen. Der Mittelwert (Datenbeschriftung) der täglichen Niederschlagsmenge liegt über den gesamten Zeitraum und für beide Standorte stets unter 5 mm. Die einzelnen Kreuze zeigen die Ausreißer, die sich über dem Whisker (1,5-facher Interquartilabstand) befinden. Besonders in den Monaten Mai bis August gibt es viele einzelne Regenereignisse, die über 10 mm pro Tag aufweisen. Am Standort Versmold ist die Anzahl der Regentage für die Monate Juni und Juli mit 13 Tagen gleich. Allerdings ist der Juni während des Sommeranbaus 2014 der niederschlagärmste Monat, mit einer Niederschlagssumme von 48 mm. Der Juli ist dagegen der niederschlagsreichste Monat, mit einer Niederschlagsmenge von 125 mm, ebenfalls verteilt auf 13 Regentage. Dies veranschaulicht die hohe Variabilität und Intensität der einzelnen Niederschlagsereignisse.

Der Verlauf der Wärmesummen ist für beide Standorte annähernd gleich (Anhang 50) und weist keinen statistisch belegbaren Unterschied auf (Anhang 47). Am Standort Lärz ergibt sich eine Temperatursumme für die Wachstumszeit von 2111,8 °C und für den Standort Versmold von 2068,2°C.

## 7.2 Boden

### 7.2.1 Wassergehalte

Die volumetrischen Wassergehalte des Bodens zur Aussaat und zur Ernte werden in Abbildung 7-6 gezeigt. Die Wassergehalte sind am Standort Lärz zur Aussaat durch das gesamte Bodenprofil höher als am Standort Versmold (11,6 %), aufgrund der höheren Niederschläge zur Aussaat (Kapitel 7.1). Zur Ernte zeigt der Standort Versmold dagegen höhere Wassergehalte in den Bodentiefen bis 60 cm. Die Wassergehalte der Bodentiefe 60-90 cm weisen am Standort Lärz aufgrund des höheren Grundwasserstandes stets höher Werte auf als am Standort Versmold. Zu beiden Beprobungszeitpunkten liegen die Wassergehalte der Standorte innerhalb des Bereichs der nutzbaren Feldkapazität (Anhang 17).

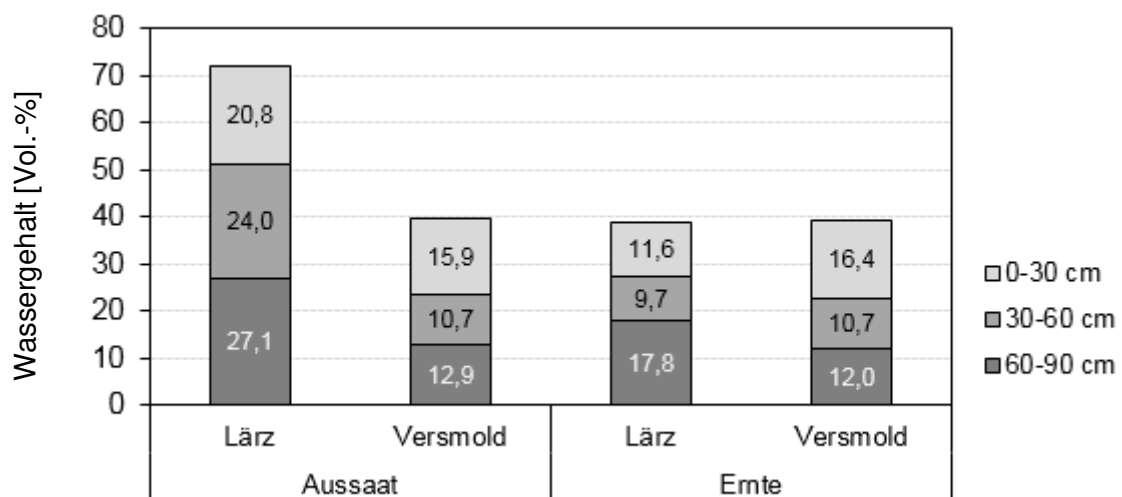


Abbildung 7-6: Volumetrische Wassergehalte der verschiedenen Bodentiefen zur Aussaat und zur Ernte, Sommeranbau 2014

### 7.2.2 Hauptnährstoffe im Boden

#### 7.2.2.1 Nitrat-Stickstoff

Nach einer Nmin-Bestimmung im Frühjahr, dürfen Sommerkulturen nach ihrem Stickstoffbedarf gedüngt werden. Jedoch darf die jährliche Düngegabe 180 kg Stickstoff pro Hektar nicht übersteigen. Aus diesem Grund weisen die Gehalte an Nitrat-Stickstoff zur Aussaat des Sommeranbaus im April 2014 deutlich höhere Werte als im Winteranbau auf. Am Standort Lärz wurden die Flächen für den Sommeranbau zuvor mit 4 t/ha Hühnertrockenkot gedüngt. Dies entspricht einer Nährstoffmenge von ca. 102 kg N/ha, 35 kg P/ha und 58 kg K/ha. Am

Standort Versmold wurden 30 m<sup>3</sup>/ha Rindergülle aufgebracht (~ 117 kg N/ha, 21 kg P/ha, 114 kg K/ha) (Anhang 13).

Die Nitrat-Stickstoffgehalte für den Sommeranbau 2014 sind in Abbildung 7-7 veranschaulicht. Die Wertetabelle dazu findet sich im Anhang 51. Zum Zeitpunkt kurz nach der Aussaat nehmen die NO<sub>3</sub>-N-Gehalte auf beiden Standorten mit zunehmender Bodentiefe ab. Am Standort Lärz beträgt der NO<sub>3</sub>-N-Gehalt im Oberboden 90,5 kg/ha, am Standort Versmold ist er mit 188,9 kg/ha gut doppelt so hoch. In der Bodentiefe 30-60 cm sind die Gehalte mit 55,1 kg für den Standort Lärz und 48,1 kg/ha für den Standort Versmold ähnlich. Kurz vor der Ernte nehmen die NO<sub>3</sub>-N-Gehalte auf beiden Standorten in den oberen beiden Bodentiefen stark ab. Am Standort Lärz konnten im Oberboden nur noch 15,5 kg Stickstoff und am Standort Versmold 22,5 kg/ha nachgewiesen werden. In der Bodentiefe von 30-60 cm wurden 9,5 und 7,1 kg/ha gemessen. In der Bodentiefe 60-90 cm bleibt der NO<sub>3</sub>-N-Gehalt am Standort Lärz nahezu gleich, wohingegen er am Standort Versmold von 10,3 auf 21,3 kg NO<sub>3</sub>-N/ha ansteigt. Zwischen Verläufen der NO<sub>3</sub>-N-Gehalte der beiden Standorte konnte kein statistischer Unterschied bestimmt werden.

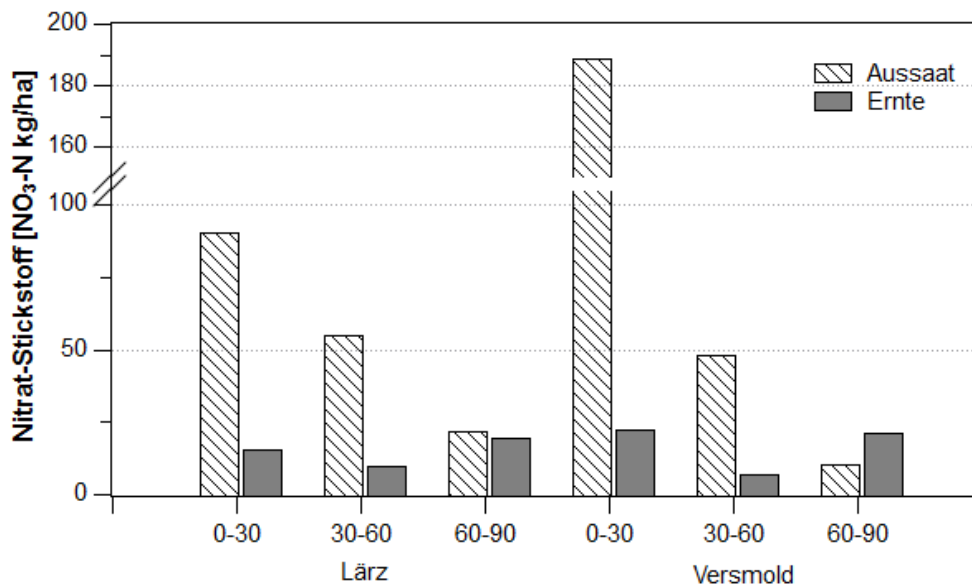


Abbildung 7-7: Nitrat-Stickstoffgehalte im Boden, Sommeranbau 2014

### 7.2.2.2 Phosphor

Die Phosphorgehalte für die oberen 30 cm Bodentiefe sind für die Standorte Lärz und Versmold in Abbildung 7-8 dargestellt. Die Phosphorgehalte aller Bodentiefe sind tabellarisch im Anhang 52 aufgeführt. Die Bodenanalysen für die Düngebedarfsermittlung werden stets im Frühjahr vor der ersten Düngung durchgeführt, um die Nährstoffgehalte im Boden zu erfassen und eine bedarfsgerechte Düngegabe aufzubringen.

Da der Hanf vor der Aussaat gedüngt wurde, spiegeln die Phosphorgehalte zur Aussaat in Abbildung 7-8 die Bodenvorräte plus die aufgebrauchte Düngemenge wider. Zur Einschätzung der Phosphorgehalte kurz nach der Aussaat ist die Bodengehaltsklasse C wieder als grauer Kasten hinterlegt. Da diese je nach Bundesland anders ist, sind auch die Größen im Diagramm unterschiedlich dargestellt (Anhang 3). Wie beim Nitrat-Stickstoff zuvor, sind die Gehalte am Standort Vermold zu beiden Probenahmen deutlich höher als am Standort Lärz. Kurz nach der Aussaat konnten am Standort Lärz in der Bodentiefe 0-30 cm 4,8 mg Phosphor pro 100 g Boden gemessen werden. Am Standort Vermold wurde ein Phosphorgehalt von 15,3 mg P/100 g Boden ermittelt. Auf beiden Standorten nimmt der Phosphorgehalt von der Aussaat zur Ernte zu. Am Standort Lärz steigt der Gehalt an Phosphor auf 7,3 mg und am Standort Vermold auf 17,9 mg/100 g Boden. Aufgrund der geringen Probenzahl konnte keine statistische Analyse durchgeführt werden.

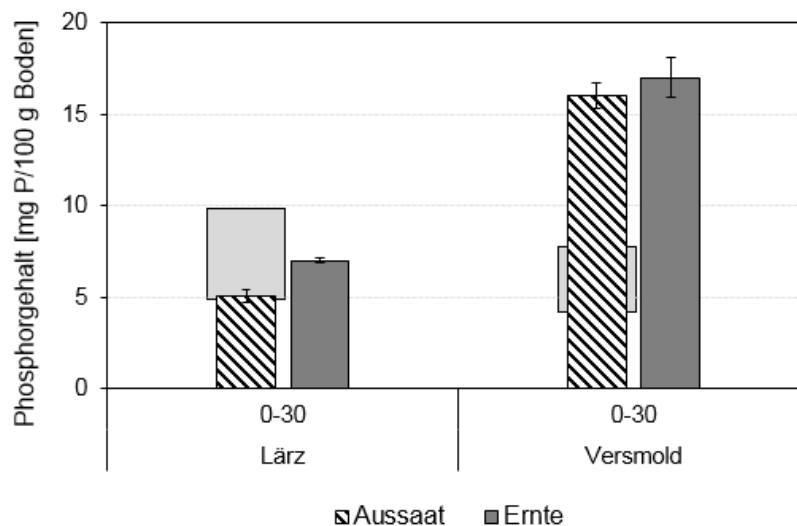


Abbildung 7-8: Phosphorgehalte der Bodentiefe 0-30 cm, Sommeranbau 2014

### 7.2.2.3 Kalium

Die Kaliumgehalte des Oberbodens für den Sommeranbau 2014 sind in Abbildung 7-9 aufgeführt. Der graue Kasten, der den Bereich der Bodengehaltsklasse C markiert, dient wie zuvor bei den Phosphorgehalten nur zur Orientierung der Gehalte kurz nach der Aussaat. Die Kaliumgehalte aller Bodentiefen sind im Anhang 53 als Tabelle dargestellt.

Am Standort Lärz nehmen die Kaliumgehalte mit 5,2 mg zur Aussaat und 5,4 mg/100 g Boden zur Ernte nahezu gleiche Werte ein. Der Gehalt zur Aussaat befindet an beiden Standorten unterhalb der Gehaltsklasse C, so dass eine deutlich höhere Kaliumgabe hätte gegeben werden können. Am Standort Vermold fällt der Kaliumgehalt von der Aussaat (8,2 mg) auf 4,2 mg/100 g Boden ab.

Mögliche statistische Unterschiede zwischen den Kaliumgehalten der Standorte konnten wegen der geringen Probenzahl nicht geprüft werden.

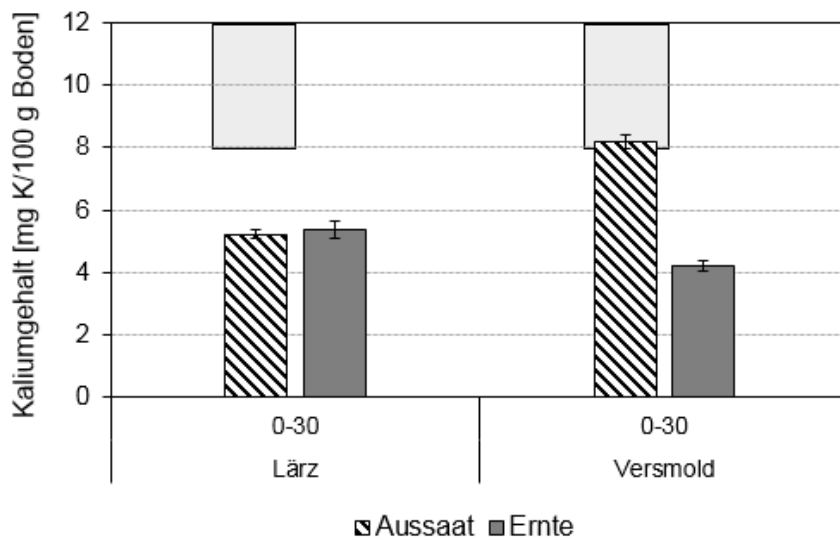


Abbildung 7-9: Kaliumgehalte der Bodentiefe 0-30 cm, Sommeranbau 2014

### 7.2.3 Heißwasserextrahierbarer Kohlenstoff und Stickstoff

In Abbildung 7-10 sind die Werte des  $C_{HWE}$  des Sommeranbaus 2014 der Probenahmen zur Aussaat und kurz vor der Ernte dargestellt. Der heißwasserlösliche Kohlenstoff nimmt bei beiden Standorten mit zunehmender Bodentiefe ab. Zur Aussaat wurden für den Standort Lärz im Oberboden Gehalte von 76,7 mg und für den Standort Versmold von 77,2 mg/100 g Boden bestimmt. Die  $C_{HWE}$ -Gehalte sind am Standort Versmold in der Bodentiefe von 30-60 cm, aufgrund der ehemaligen Plaggenbewirtschaftung, höher als am Standort Lärz.

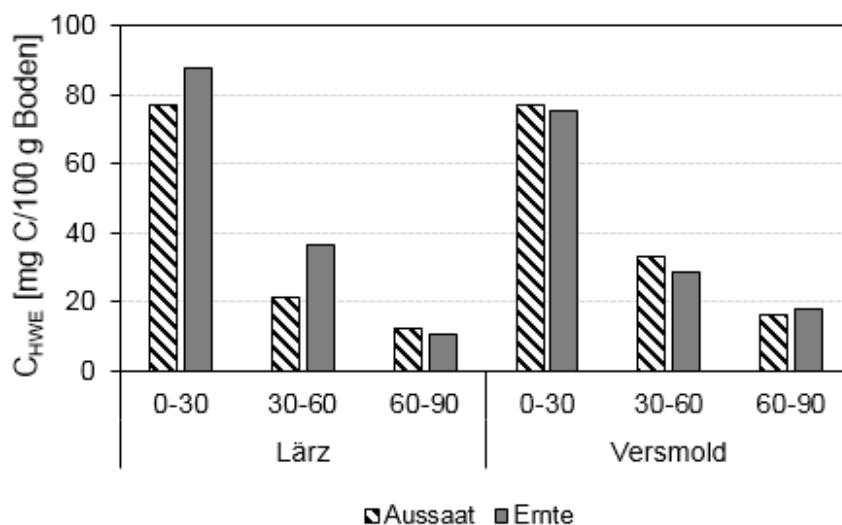


Abbildung 7-10: Heißwasserextrahierbarer Kohlenstoff im Boden, Sommeranbau 2014



Während die Gehalte an heißwasserlöslichem Kohlenstoff am Standort Vermold von der Aussaat bis zur Ernte in allen Bodentiefen leicht abnehmen, steigen sie am Standort Lärz in den Bodentiefen 0-30 cm und 30-60 cm dagegen an (Anhang 54). Zwischen den heißwasserlöslichen Kohlenstoffgehalten der Standorte Lärz und Vermold konnten signifikante Unterschiede für die Bodentiefen 0-30 cm ( $p = 0,009^{**}$ ) und 60-90 cm ( $p \leq 0,001^{***}$ ) bestimmt werden (Anhang 55).

Auch im Sommeranbau besteht eine starke Korrelation zwischen dem heißwasserextrahierbaren Kohlenstoff und den  $C_{org}$ -Gehalten ( $p \leq 0,001$ ,  $R^2 = 0,956$ ,  $n = 6$ ).

Abbildung 7-11 zeigt die Gehalte an heißwasserlöslichem Stickstoffs zur Aussaat und zur Ernte. Zur Aussaat wurden am Standort Lärz Gehalte von 8,2 mg und am Standort Vermold von 7,7 mg  $N_{HWE}/100$  g Boden gemessen. Dieser Wert steigt am Standort Lärz bis zur Ernte geringfügig an, wohingegen er am Standort Vermold nahezu gleich bleibt. In der Bodentiefe von 30 - 60 cm ist an den Standorten ein gegenläufiger Trend zu beobachten, während am Standort Lärz der Gehalt von  $N_{HWE}$  von 0,7 mg auf 4,0 mg/100 g ansteigt, sinkt der Gehalt am Standort Vermold von 1,4 auf 0,9 mg/100 g Boden ab. In der Bodentiefe von 60-90 cm liegen die  $N_{HWE}$ -Gehalte an beiden Standorten zu beiden Beprobungen unter 1 mg/100 g Boden (Anhang 54). Es ergibt sich ein statistischer Unterschied zwischen den  $N_{HWE}$ -Gehalten der beiden Standorte für die Bodentiefe 0-30 cm ( $p = 0,004^{**}$ ) und 60 - 90 cm ( $p \leq 0,001^{***}$ ) (Anhang 55).

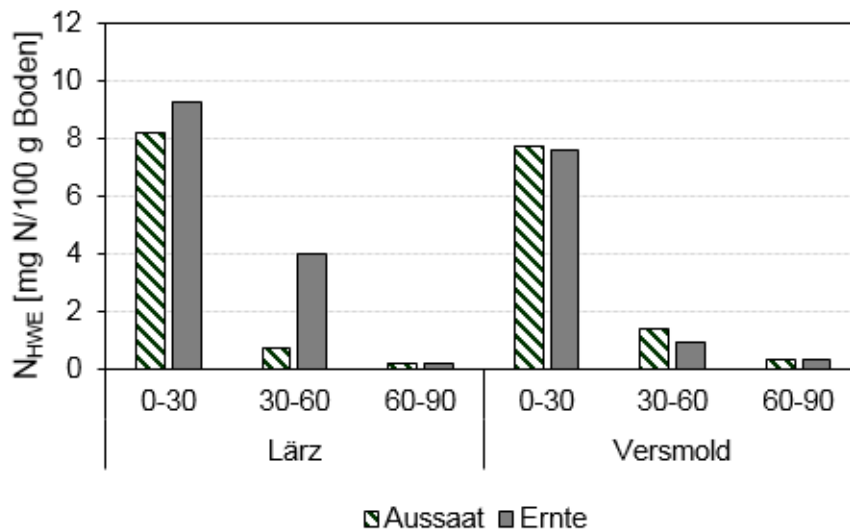


Abbildung 7-11: Heißwasserextrahierbarer Stickstoff im Boden, Sommeranbau 2014

Der Verlauf des  $N_{HWE}$  ist mit dem des  $C_{HWE}$  korreliert ( $p \leq 0,001$ ,  $R^2 = 0,971$ ,  $n = 6$ ). Des Weiteren konnte eine Korrelation zwischen dem  $N_{HWE}$  und dem  $N_t$ -Gehalt bestimmt werden ( $p = 0,005$ ,  $R^2 = 0,904$ ,  $n = 6$ ).

## 7.3 Pflanzen

### 7.3.1 Pflanzenbonituren

Die Ergebnisse der Pflanzenbonituren der Standorte Lärz und Versmold zur Ernte im Sommeranbau 2014 sind in Tabelle 7-1 dargestellt. Am Standort Lärz wuchsen signifikant höhere Pflanzen ( $p \leq 0,001^{***}$ ,  $n = 74$ ), die eine mittlere Pflanzenhöhen von 328,1 cm aufweisen. Am Standort Versmold wurden Pflanzenhöhen von 215,4 cm erreicht. Die Variabilität der Pflanzenhöhen ist sehr hoch; am Standort Lärz wurden Pflanzenhöhen zwischen 135 und 420 cm bestimmt, am Standort Versmold zwischen 72 und 343 cm. Die Stängeldurchmesser sind mit 11,7 mm am Standort Lärz signifikant größer als am Standort Versmold mit 7,3 mm ( $p \leq 0,001^{***}$ ,  $n = 74$ ). Zwischen den Wurzellängen und der Pflanzenzahl pro Quadratmeter konnte zwischen den Standorten kein statistisch belegbarer Unterschied gefunden werden. Die Pflanzenzahl/m<sup>2</sup> ist mit 25,6 und 35,6 Pflanzen auf beiden Standorten sehr niedrig. Nach der Saatstärke von 25 kg/ha, müssten 130 Pflanzen/m<sup>2</sup> aufgelaufen sein. Da vor der Aussaat keine Keimprobe des Saatguts und nach dem Auflaufen keine Auszählung der Pflanzen durchgeführt wurde, können keine Aussagen über die Ausdünnungsrate getroffen werden. Am Standort Lärz wurde von einem schlechten Auflaufen der Keimlinge berichtet.

**Tabelle 7-1: Pflanzenbonituren, Sommeranbau 2014**

	<i>Mittelwert</i>	<i>Median</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>
<i>Pflanzenhöhe [cm]</i>						
Lärz	328,1	357	135	420	71,8	75
Versmold	215,4	215	72	343	37,8	74
<i>Stängeldurchmesser [mm]</i>						
Lärz	11,7	12	3	21	4,3	75
Versmold	7,3	7	1	16	3,2	74
<i>Wurzellänge [cm]</i>						
Lärz	17,8	19	8	30	5,4	75
Versmold	18,0	18	7	41	6,6	74
<i>Pflanzen/m<sup>2</sup></i>						
Lärz	25,6	24	18	32	5,8	5
Versmold	35,6	38	14	38	15,3	5

Auch für den Sommeranbau 2014 ergibt sich eine Korrelation zwischen Pflanzenhöhe und Stängeldurchmesser ( $p \leq 0,001$ ,  $R^2 = 0,862$ ,  $n = 149$ ) (Abbildung 7-12). Das Bestimmtheitsmaß ist mit  $R^2 = 0,862$  höher als im Winteranbau 2013/14 ( $R^2 = 0,312$ ). Der Stängeldurchmesser von 8 mm ist am häufigsten vertreten, mit Pflanzenhöhen zwischen 180 cm und 300 cm. Stängeldurchmesser von unter 3 mm und größer als 16 mm bilden die Ausnahme. Zwischen der Pflanzenhöhe und der Wurzellänge konnte eine schwache Korrelation bestimmt werden ( $p \leq 0,001$ ,  $R^2 = 0,130$ ,  $n = 147$ ). Am Standort Lärz wurden Stängeldurchmesser von 3 bis 21 mm ausgebildet, am Standort Versmold zwischen 1 und 16 mm.

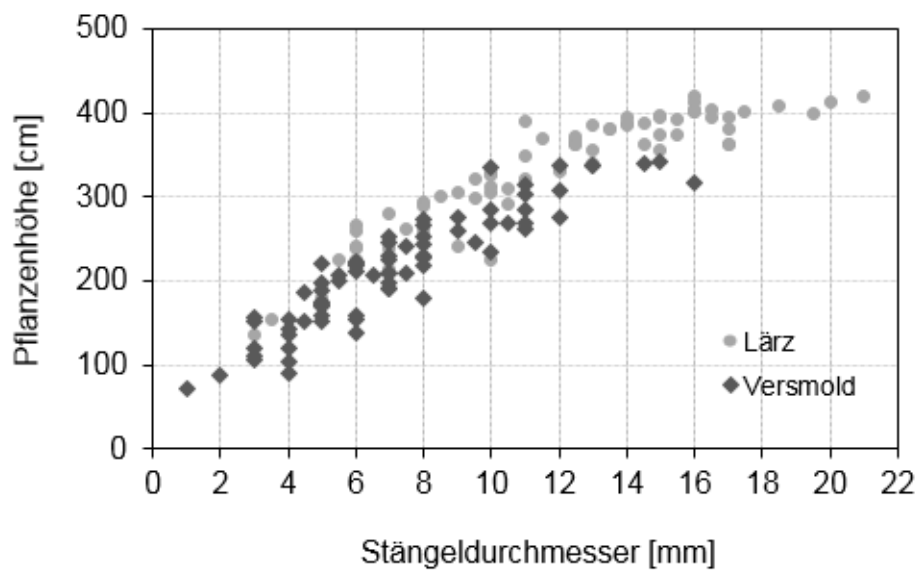


Abbildung 7-13: Verhältnis von Pflanzenhöhen zu Stängeldurchmesser, Sommeranbau 2014

Der Ernteertrag wurde aus den getrockneten Stängelmassen der Quadratmeterernten auf einen Hektar hochgerechnet (Abbildung 7-13). Für den Standort Lärz ergeben sich Stroherträge zwischen 106,9 und 152,7 dt/h, im Mittel 126,8 dt/ha. Am Standort Versmold wurden Strohgewichte von 34,9 bis 135,7 dt/ha berechnet, mit 67,8 dt/ha als Mittelwert. Der Standort Lärz brachte signifikant höhere Hektarerträge als der Standort Versmold hervor ( $p = 0,014^{**}$ ). Auch hier muss auf die hohe Variabilität der Pflanzenzahl pro Quadratmeter und der Pflanzenhöhe innerhalb der Bestände hingewiesen werden. Die Quadratmeterernten spiegeln nicht den kompletten Bestand wider, wodurch die berechneten Erträge die realen Felderträge überschätzen.

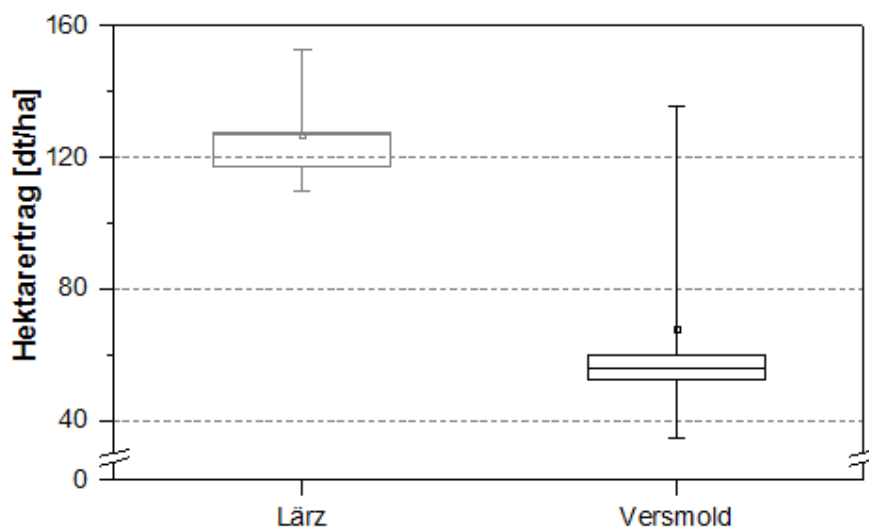


Abbildung 7-12: Box-Whisker-Plot der Hektarerträge, Sommeranbau 2014

Die prozentualen Gewichtsanteile der Pflanzenorgane am Gesamtpflanzengewicht sind in Abbildung 7-14 veranschaulicht. An beiden Standorten nimmt die Stängelmasse den größten Anteil am Gesamtpflanzengewicht ein. Dabei wurde am Standort Lärz mit 76,4 % signifikant mehr Stängelmasse ausgebildet als am Standort Vermold ( $p \leq 0,001^{***}$ ,  $n = 5$ ). Bezüglich der Blattmasse konnte zwischen den Standorten kein statistischer Unterschied festgestellt werden, obwohl am Standort Vermold mit 17,3 % im Trend mehr Blattmasse ausgebildet wurde. Die Wurzelmasse ist an beiden Standorten mit Anteilen von 7,4 und 7,7 % nahezu gleich. Am Standort Vermold bildeten die Pflanzen zur Ernte mit 7,4 % signifikant mehr Blütenmasse aus als am Standort Lärz ( $p \leq 0,001^{***}$ ,  $n = 5$ ). Dies ist durch die unterschiedliche Sorte im Sommeranbau begründet. Am Standort Lärz wurde die Sorte Futura ausgesät, da die am Standort Vermold verwendete Sorte Fedora aufgrund von Lieferschwierigkeiten nicht verfügbar war. Laut Literatur wird Futura als späte Sorte beschrieben, wodurch sie später in die Blüte geht.

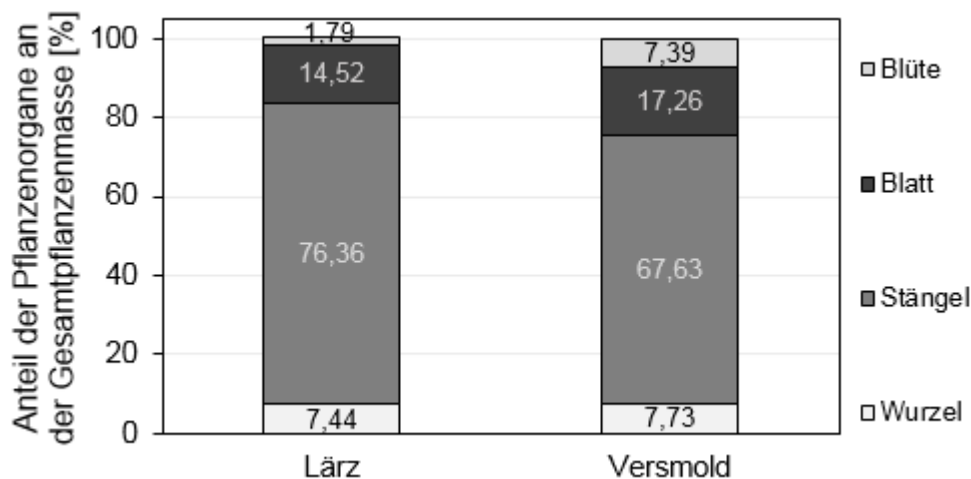


Abbildung 7-14: Prozentualer Anteil der Pflanzenanteile am Gesamtpflanzengewicht, Sommeranbau 2014

### 7.3.2 Pflanzenanalyse

Die Nährstoffgehalte an Stickstoff, Phosphor und Kalium sind in Tabelle 7-2 aufgelistet. An beiden Standorten wurden in den Blüten die höchsten Stickstoffgehalte nachgewiesen. Am Standort Lärz wurden in der Blüte 4,13 % und am Standort Vermold 3,88 % Stickstoff eingelagert. In der Stängelmasse wurden dagegen die niedrigsten Stickstoffgehalte ermittelt. Die Phosphorgehalte nehmen über Blüte, Blatt und Stängel hin zur Wurzel ab. Die Kaliumgehalte zeigen demgegenüber ein anderes Bild, die höchsten Gehalte können nicht wie zuvor in der Blüte, sondern in der Blattmasse festgestellt werden. Aufgrund zu weniger Messwiederholungen konnte hier keine statistische Auswertung durchgeführt werden. Im Trend konnten am Standort Vermold höhere Nährstoffgehalte in den einzelnen Pflanzenorganen bestimmt werden.

**Tabelle 7-2: Nährstoffgehalte in den verschiedenen Pflanzenteilen, Sommeranbau 2014**

		<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>
		[%]	[%]	[%]
Lärz	Blüte	4,13	0,74	1,84
	Blatt	2,59	0,27	3,36
	Stängel	0,57	0,14	1,07
	Wurzel	0,61	0,15	1,24
Vermold	Blüte	3,88	0,89	1,92
	Blatt	2,79	0,53	4,53
	Stängel	0,65	0,23	1,22
	Wurzel	0,72	0,18	1,60

Der Nährstoffentzug durch die Pflanzen wurde über die Nährstoffgehalte der einzelnen Pflanzenorgane, unter Berücksichtigung ihrer prozentualen Anteile an der Gesamtpflanzenmasse, berechnet. Als Bezugsgröße wurde der Nährstoffentzug in Kilogramm pro Tonne Strohertrag und Hektar gewählt, um die Werte mit den Literaturangaben vergleichen zu können. Daraus ergibt sich für den Standort Lärz ein Nährstoffentzug von 12,2 kg N, 2,2 kg P und 18,8 kg K pro Tonne Ertrag und Hektar. Am Standort Vermold nehmen die Pflanzen pro Tonne Ertrag mehr Nährstoffe pro Hektar auf (18,7 kg N, 4,9 kg P, 27,7 kg K). Kalium wurde von den Hanfpflanzen am stärksten in die Pflanzenmasse eingebaut, gefolgt von Stickstoff. Phosphor wurde in deutlich geringeren Mengen aufgenommen.

Rechnet man die Nährstoffentzüge auf die bestimmten Hektarerträge um, ergeben sich die in Tabelle 7-3 aufgeführten Werte. Die höchsten Nährstoffentzüge wurden durch das Kalium hervorgerufen, gefolgt von den Stickstoffentzügen. Der Bedarf der Hanfpflanzen an Phosphor ist gegenüber den anderen beiden Nährstoffen gering.

**Tabelle 7-3: Nährstoffentzüge durch den Hanfanbau, berechnet anhand der bestimmten Erntemengen, Sommeranbau 2014**

<i>Nährstoffentzug durch Hanfpflanzen [kg/Ertrag Sommeranbau 2014*ha]</i>									
	<i>N</i>	Min	Max	<i>P</i>	Min	Max	<i>K</i>	Min	Max
Lärz	154,0	130,7	187,0	27,9	23,7	33,9	236,3	200,6	286,9
Vermold	126,5	65,3	251,9	33,0	17,0	65,7	188,0	97,0	374,3

Die Bilanzierung der Nährstoffentzüge ergibt bis auf die Nährstoffgehalte für Stickstoff am Standort Vermold, durchweg eine Nährstoffanreicherung im Boden über die Pflanzenentzüge hinaus. Die Nährstoffgehalte am Standort Lärz sind zur Aussaat geringer als am Standort Vermold, wohingegen die Entzüge durch die Pflanzen, aufgrund des höheren Ertrages höher ausfallen. Der Nährstoffüberschuss im Boden ist am Standort Lärz für alle Nährstoffe höher als am Standort Vermold.

**Tabelle 7-4: Nährstoffbilanzen im Boden von der Aussaat bis zur Ernte, Sommeranbau 2014**

	<i>Boden- Nährstoff- gehalt zur Aussaat</i>	<i>Pflanzen-ent- zug</i>	<i>Bodengehalt errechnet aus Pflanzenent- zug [Soll]</i>	<i>Bodennähr- stoffgehalt zur Ernte [Ist]</i>	<i>Bilanz</i>
<i>NO<sub>3</sub>-N[kg/ha*90 cm Bodentiefe]</i>					
Lärz	167,4	154,1	13,3	44,6	+31,3
Versmold	247,3	126,5	120,8	50,8	-70,0
<i>P<sub>DL</sub> [kg/ha*30 cm Bodentiefe]</i>					
Lärz	200,0	27,9	172,1	277,2	+105,1
Versmold	657,6	17,0	640,6	698,7	+58,1
<i>K<sub>DL</sub> [kg/ha*30 cm Bodentiefe]</i>					
Lärz	214,2	236,3	-22,1	220,3	+242,2
Versmold	325,1	188,0	137,1	166,4	+29,3

### 7.3.3 Faserqualität

Die Ergebnisse der Faserqualität des Sommeranbaus 2014 sind in Tabelle 7-5 zusammengefasst. Die Darstellung als Box-Whisker-Diagramm ist im Anhang 57 zu finden. Am Standort Lärz werden für alle Parameter signifikant höhere Werte erreicht (Anhang 56). Insbesondere die Zugfestigkeit sowie der Zugmodul weisen über doppelt so hohe Werte auf, wie am Standort Versmold. Die Fasermassegehalte der Pflanzenproben der Sorte Futura zeigen am Standort Lärz mit 23,9 % einen geringeren Anteil als bei den Proben der Sorte Fedora am Standort Versmold (29,4 %).

**Tabelle 7-5: Parameter der Faserqualität, Sommeranbau 2014**

	<i>Mittelwert</i>	<i>Median</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>
<i>Faserbreite [µm]</i>				
Lärz	73,84	50,53	60,79	24172
Versmold	68,92	49,17	54,26	24303
<i>Zugfestigkeit [MPa]</i>				
Lärz	498,86	433,90	398,11	78
Versmold	207,81	178,23	132,99	80
<i>Zugmodul [MPa]</i>				
Lärz	26757,75	24359,72	14763,72	78
Versmold	11994,06	11326,94	5420,01	80
<i>Bruchdehnung [%]</i>				
Lärz	1,91	1,87	0,64	78
Versmold	1,53	1,48	0,69	80

## 7.4 Zusammenfassung Sommeranbau 2014

Den Hanfpflanzen standen im Sommeranbau 2014 am Standort Lärz 404,4 mm und am Standort Versmold 410,4 mm Niederschlag zur Verfügung. Als Wärmesumme berechnen sich für den Standort Lärz 2105,8°C und für den Standort Versmold 2068,2°C. Im Boden konnten für den Standort Lärz 90,5 kg, sowie 188,9 kg Stickstoff pro Hektar für den Standort Versmold ermittelt werden. Unter diesen Bedingungen entwickelten sich am Standort Lärz signifikant höhere Pflanzen mit einem größeren Stängeldurchmesser. Dadurch ergibt sich für den Standort Lärz trotz geringerer Pflanzen pro Quadratmeter ein signifikant höherer Ernteertrag. In der Faserqualität sind die Faserbreiten, sowie der Zugmodul im Sommeranbau am Standort Lärz signifikant höher als alle im Winteranbau gemessenen Werte. Im Sommeranbau kann zwischen der Pflanzenhöhe und dem Ernteertrag eine Korrelation bestätigt werden ( $p = 0,025$ ,  $R^2 = 0,683$ ,  $n = 15$ ). Die Pflanzenzahl pro Quadratmeter beeinflusste die Höhe des Ertrages nicht.

## 8 Vergleich Winter- und Sommeranbau

Im Winteranbau stehen den Hanfpflanzen durch die Aussaat ab Mitte Juli deutlich weniger Tage für das Längenwachstum zur Verfügung als im Sommeranbau mit einer Aussaat ab Mitte April. Wird von einem Blühbeginn Ende August ausgegangen, ergibt sich für den Winteranbau eine Wachstumszeit von 46 Tagen gegenüber dem Sommeranbau mit ca. 138 Tagen. Dadurch gehen niedrigere Wärme- und Niederschlagssummen hervor. Im Winteranbau 2013/14 wurde eine Wärmesumme von 1100,4°C am Standort Lärz und 1115,6°C für den Standort Vermold bestimmt, sowie eine Niederschlagssumme von 228 mm (Standort Lärz) und 123 mm (Standort Vermold). Im Sommeranbau ergeben sich Wärmesummen von 2062,2°C (Standort Lärz) und 2118 °C (Standort Vermold). Die Niederschläge summieren sich am Standort Lärz auf 415,4 mm und am Standort Vermold auf 410 mm auf. Im Winteranbau stehen durch die begrenzte Düngemittelgabe den Pflanzen geringere Nährstoffmengen zur Verfügung, die für die reduzierte Pflanzenentwicklung aufgrund der verkürzten Wachstumszeit ausreichen. Die Pflanzhöhen liegen im Winteranbau 2013/14 zwischen 102 cm und 131 cm und bleiben signifikant hinter denen des Sommeranbaus 2014 zurück (215-328 cm) ( $p \leq 0,001^{***}$ ). Die Stängeldurchmesser nehmen im Winteranbau 2013/14 Werte zwischen 4,2 und 7,0 mm ein, im Sommeranbau 2014 zwischen 7,3 und 11,7 mm. Der Unterschied ist signifikant ( $p \leq 0,001^{***}$ ). Daraus resultieren signifikant geringere Hektarerträge im Winteranbau mit ca. 25 dt gegenüber Hektarerträgen des Sommeranbaus zwischen 50 und 120 dt ( $p \leq 0,001^{***}$ ). Im Winteranbau 2013/14 bilden die Pflanzen mehr Blattmasse (23,9-27,4 %) als im Sommeranbau 2014 (14,5-17,3 %) aus. Ebenso weisen die Stängel höhere Stickstoffgehalte (0,77-1,14 %) als im Sommeranbau 2014 (0,57-0,65 %) auf.

In Tabelle 8-1 sind die Werte der Faserqualitäten des Winteranbaus 2013/14 und dem Sommeranbau 2014 gegenübergestellt. Im Trend wurden im Winteranbau geringere Faserbreiten ausgebildet, die eine niedrigere Zugfestigkeit und einen kleineren Zugmodul bedingen. Die statistische Auswertung konnte diesen Trend nicht eindeutig für die Faserbreite und die Zugfestigkeit belegen. Der Zugmodul der Fasern des Winteranbaus ist signifikant geringer als der im Sommeranbau. Des Weiteren zeigen die Fasern im Winteranbau 2013/14 eine signifikant höhere Bruchdehnung. Die Auswertung der statistischen Analyse befindet sich im Anhang 58.

**Tabelle 8-1: Vergleich der Faserqualitäten Winteranbau 2013/14 und Sommeranbau 2014**

	<i>Winteranbau 2013/14</i>	<i>Sommeranbau 2014</i>
Faserbreite [ $\mu\text{m}$ ]	63,2 - 70,4	68,9 - 73,8
Zugfestigkeit [MPa]	148,7 - 402,2	207,8 - 498,9
Zugmodul [MPa]	8289,9 - 16538,7	11994,1 - 26757,8
Bruchdehnung [%]	1,9 - 3,3	1,5 - 1,9

Im Gegensatz zu den Fasern aus dem konventionellen Sommeranbau konnten die Fasern aus dem Winteranbau 2013/14 bei der Weiterverarbeitung zu Formpressteilen ohne die Beimengung von weiteren Naturfasern (z.B. Flachs, Kenaf) verwendet werden.

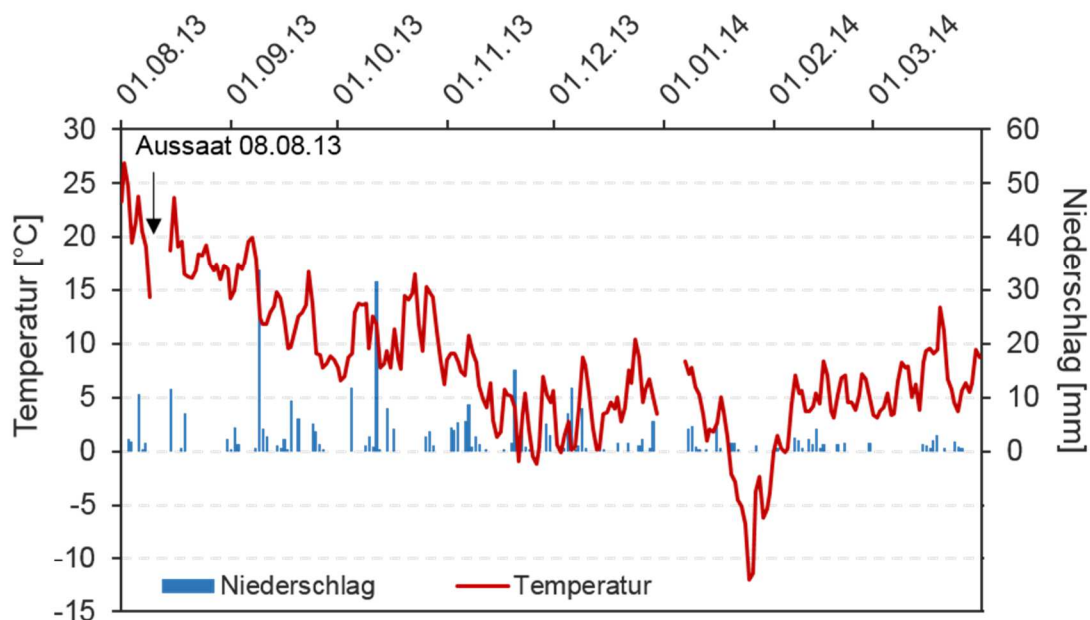


## 9 Lysimeterexperiment

### 9.1 Wetterdaten

Die Wetterdaten der Lysimeterstation Falkenberg für den Winteranbau des Faserhanfes 2013/14 sind in Abbildung 9-1 dargestellt. Im Temperaturverlauf zeigt sich ein relativ warmer September und Oktober mit Durchschnittstemperaturen von 13,1 und 10,9°C. Der ersten Minustemperaturen wurden am 14.11.13 aufgezeichnet. Nach einem frostfreien Dezember, folgte ab dem 20. Januar 2014 eine 13-tägige Periode von Frosttagen. Die niedrigste Tagesmitteltemperatur wurde am 25.01.14 mit -12°C gemessen. Der Juli war mit einer Niederschlagssumme von 37,1 mm sehr trocken.

Die Temperaturverläufe und Niederschlagsmengen über die Wachstumsphase von August bis September unterscheiden sich nicht signifikant von den beiden Feldversuchsstandorten Lärz und Vermold (Abbildung 6-1, Abbildung 6-2.).



	<i>Jul</i>	<i>Aug</i>	<i>Sep</i>	<i>Okt</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	<i>Jan</i>	<i>Feb</i>	<i>März</i>
	<i>13</i>	<i>13</i>	<i>13</i>	<i>13</i>	<i>13</i>	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>14</i>	<i>14</i>
Monatsmitteltemperatur [°C]	19,1	13,1	10,9	5,0	4,2	-0,4	4,4	6,6	19,1
Niederschlagssumme [mm]	37,1	76	66,9	61,8	41,4	19,3	18,9	11,2	37,1
Anzahl Regentage	8	15	10	14	15	9	13	9	8

Abbildung 9-1: Wetterdaten der Lysimeterstation Falkenberg, Winteranbau 2013/14

Die beiden Starkregenereignisse am 09.09.13 und 12.10.13 mit 33,7 mm bzw. 31,5 mm treten im Niederschlagsverlauf deutlich hervor. Ansonsten liegen die Niederschläge unter 10 mm pro Tag. In den 14 Tagen nach der Aussaat am 08.08.13 standen dem Saatgut für die Keimung und den Pflanzenaufgang nur 19 mm Niederschlag zur Verfügung. Für die Hauptwachstums-

zeit von der Aussaat (08.08.2013) bis Ende September ergibt sich eine Niederschlagsmenge von 98,5 mm sowie eine Wärmesumme von 731,5°.

Im Sommeranbau 2014 wurden die in Abbildung 9-2 dargestellten Temperatur- und Niederschlagsverläufe aufgezeichnet. Bereits Ende Mai konnten Tagesmitteltemperaturen von über 20°C ermittelt werden. Auch Anfang Juni wurden diese Temperaturen erreicht, wonach die zweite Junihälfte mit Tagesmitteltemperaturen um die 15°C eher kühl verlief. Nachdem der Aussaatmonat April geringe Niederschläge mit einer Monatssumme von 32,4 mm aufwies, folgte ein niederschlagsreicher Sommer mit 73,8 mm im Juni und 136,8 mm im Juli. Zwischen dem Temperatur- und Niederschlagsverlauf an der Lysimeterstation und den Feldstandorten konnte im Sommeranbau 2014 keine statistisch nachweisbaren Unterschiede berechnet werden (Anhang 59).

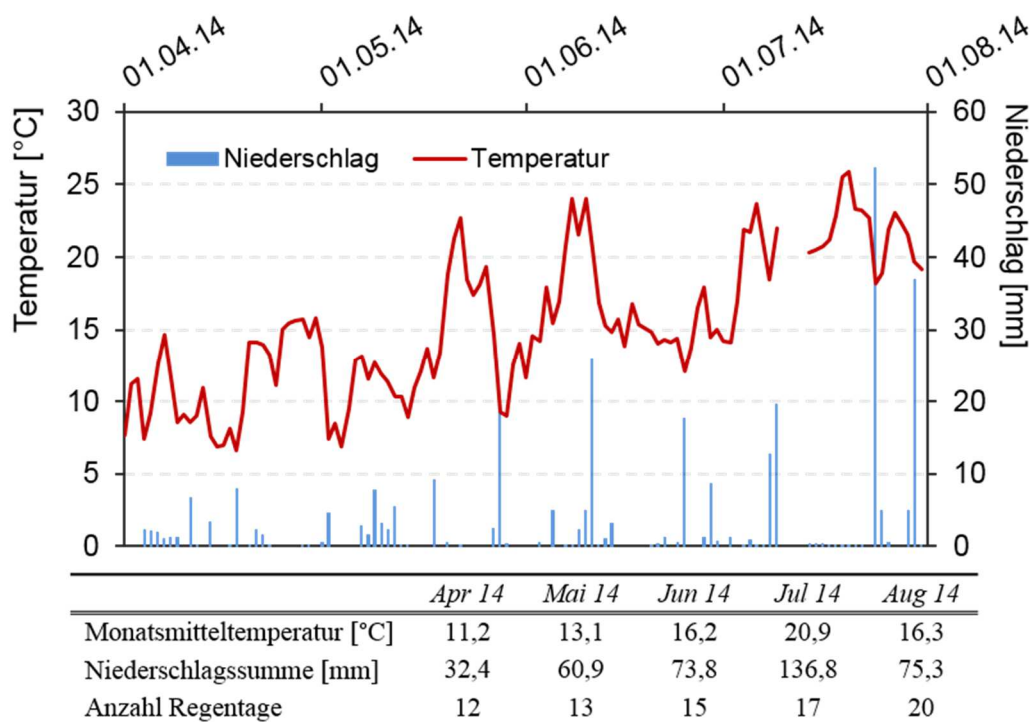


Abbildung 9-2: Wetterdaten der Lysimeterstation Falkenberg, Sommeranbau 2014

Im Winteranbau 2014/15 zeigt sich im Temperaturverlauf ein relativ kühler August mit Tagesmitteltemperaturen ab der zweiten Monatshälfte von unter 15°C (Abbildung 9-3). Der erste Frost wurde am 30.11.2014 aufgezeichnet. Im Wechsel mit warmen Abschnitten folgen bis Anfang Februar vier weitere Frostperioden. Ende Juli, Anfang August gibt es drei Starkregenereignisse, bei denen innerhalb von 12 Tagen eine Niederschlagsmenge von 125,5 mm fiel. Die darauffolgenden Monate September bis November sind sehr niederschlagsarm. Im September und Oktober wurden nur 33,4 und 31,2 mm Niederschlag aufgefangen, im November sogar nur 7,5 mm.

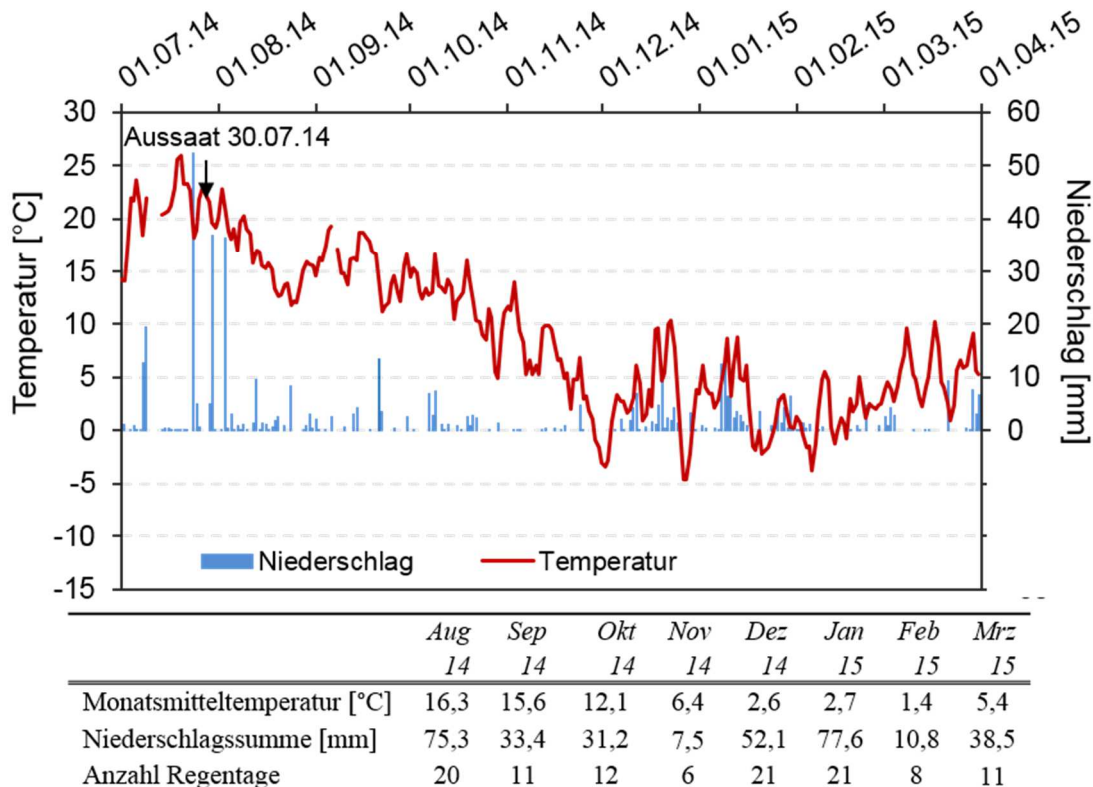


Abbildung 9-3: Wetterdaten der Lysimeterstation Falkenberg, Winteranbau 2014/15

Die Temperatur- und Niederschlagsverläufe des Winteranbaus 2013/14 und 2014/15 weisen keine statistischen Unterschiede für die Wachstumsmonate August und September auf (Anhang 59). Da 2014/15 kein Winteranbau mehr auf den Feldversuchsflächen in Vermold und Lärz durchgeführt wurden, entfällt der Vergleich der Wetterdaten mit den Versuchsstandorten. In der Darstellung nach Heyland (1991) standen den Hanfpflanzen im Winteranbau 2013/14 für die Wachstumsmonate August bis September ausreichend Wasser für das Pflanzenwachstum zur Verfügung (Anhang 60). Im Sommeranbau 2014 fiel die Aussaat in einen Zeitraum mit Wasserstress, der von Februar bis Mitte April 2014 andauerte. Anschließend ergab sich für die Pflanzen in der Jugendentwicklung und in der Hauptwachstumsphase eine ausreichende Wassermenge. Im Winteranbau 2014/15 wies die gesamte Wachstumszeit von August bis Oktober des Winteranbaus 2014/15 einen Wasserstress für die Pflanzen auf (Anhang 60).

## 9.2 Pflanzenbonituren

Die Hanfaussaat des Winteranbaus 2013/14 erfolgte auf vier Kastenlysimetern am 08.08.2013. Die Aussaatstärke betrug wie im Feldversuch 25 kg Saatgut pro Hektar, umgerechnet auf einen Quadratmeter 2,5 g Saatgut bzw. 130 Körner. Die Wachstumsverläufe der Hanfpflanzen für den Winteranbau 2013/14 sind in Abbildung 9-4 dargestellt. Dabei wurden fünf Pflanzen der einzelnen Lysimeter in ca. zweiwöchigen Abständen vermessen. Da sich die Wachstumsverlauf der beiden ungedüngten Lysimeter (Nr. 29 und 30), sowie der gedüngten Lysimeter (Nr. 116 und 117) nicht signifikant unterschied, wurden die Messergebnisse graphisch zusammengefasst. Die Pflanzen in der ungedüngten Variante bleiben im Wachstum signifikant ( $p \leq 0,001^{***}$ ) hinter dem Wachstum der mit 80 kg N/ha gedüngten Variante zurück (Anhang 61). Sie erreichen bis zum Blühbeginn am 24.09.2013 eine Höhe von 65,1 cm. Die gedüngte Variante maß zu diesem Zeitpunkt im Mittel 89,8 cm.

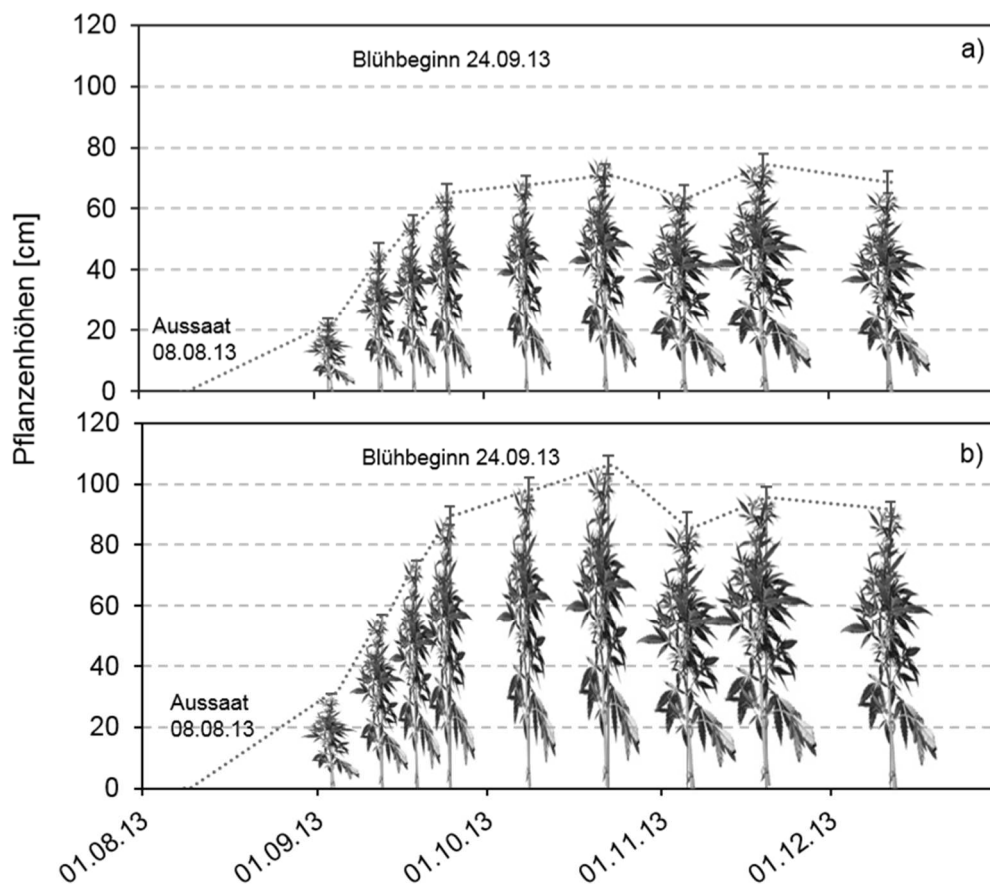


Abbildung 9-4: Pflanzenhöhen Winteranbau 2013/14 Lysimeter, ungedüngte Lysimeter (a) und mit 80 kg N/ha gedüngte Lysimeter (b)

Im März des Folgejahres wurden die Lysimeter geerntet und die Pflanzen gezählt, gewogen und vermessen. Dabei ergibt sich für die Lysimeter 29 und 30 (ungedüngt) ein Ertrag, hochgerechnet auf einen Hektar, von 7,7 bzw. 7,0 dt/ha. Auf den gedüngten Lysimeter wurde ein Ertrag von 27,1 und 23,2 dt/ha ermittelt. Auf den ungedüngten Lysimetern standen zur Ernte 97 bzw. 93 Pflanzen pro Quadratmeter, auf den gedüngten Lysimetern wurden 107 bzw. 104 Pflanzen ausgezählt. Daraus errechnet sich in der ungedüngten Variante eine mittlere

Ausdünnungsrate von 25,8% und für die gedüngte Variante 17,6 %. Im Vergleich zu den Feldversuchen ist die Ausdünnungsrate auf den Lysimetern geringer (Tabelle 6-3).

Die Pflanzen auf den gedüngten Lysimetern bildeten signifikant höhere Pflanzenlängen (ungedüngt: 64,1 cm, gedüngt: 91,7 cm,  $p \leq 0,001^{***}$ ) mit größeren Stängeldurchmessern aus (ungedüngt: 3,6 mm, gedüngt: 5,2 mm,  $p \leq 0,001^{***}$ ) (Anhang 61). Die Streuung der Messwerte ist jeweils in der ungedüngten Variante geringer (Abbildung 9-5). Zwischen der Pflanzenhöhe und dem Stängeldurchmesser besteht eine starke Korrelation ( $p \leq 0,001$ ,  $R^2 = 0,692$ ,  $n = 58$ ).

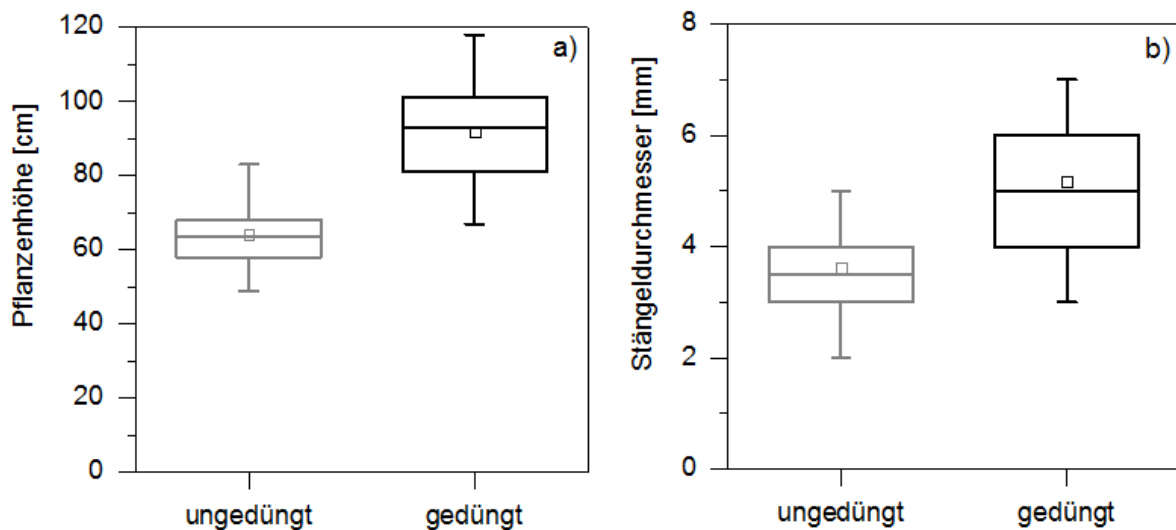
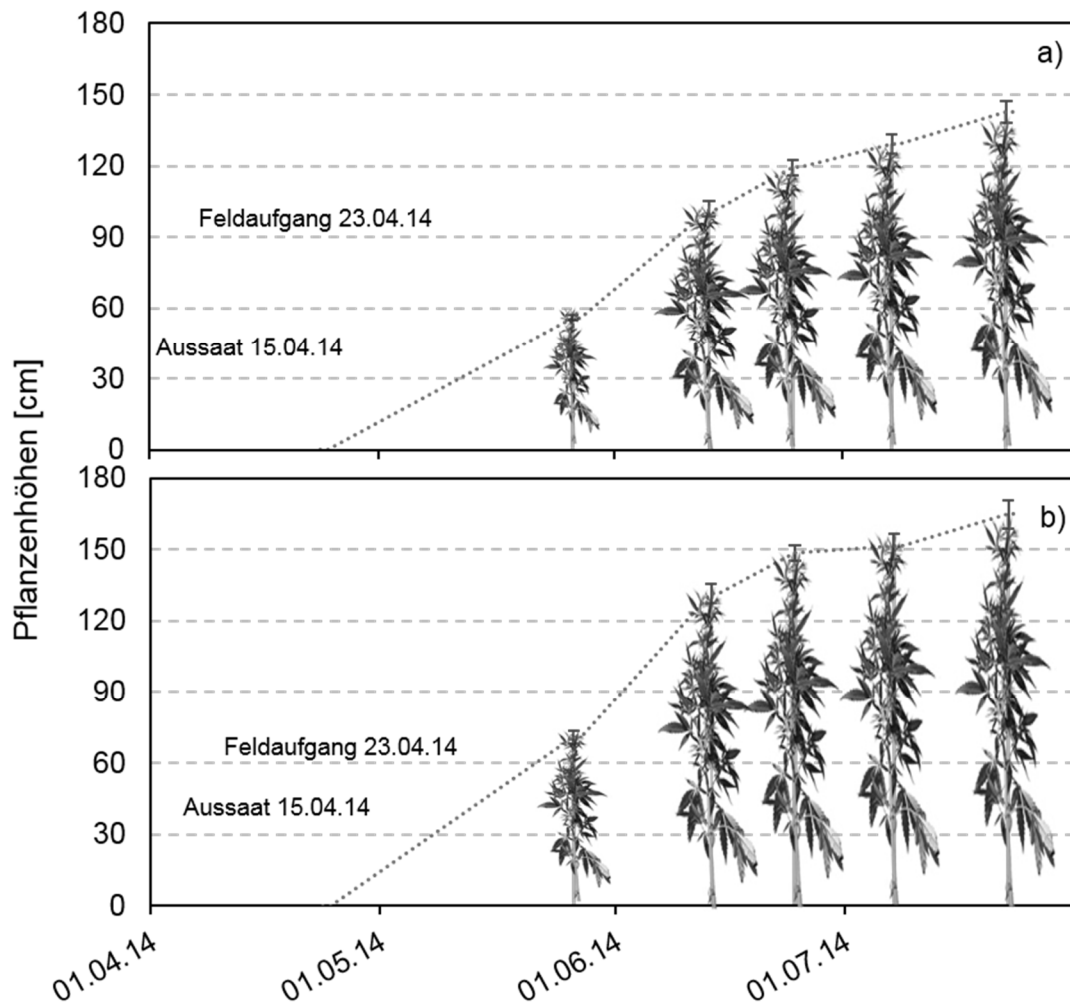


Abbildung 9-5: Box-Whisker-Plot der Pflanzenhöhe (a) und des Stängeldurchmessers (b) zur Ernte

Während der Anbauzeit von August bis März des Folgejahres konnten von den Lysimetern keine Pflanzen entnommen werden, um die Bedeckung durch den Bestand nicht zu verändern. Daher können für den Winteranbau keine Aussagen über mögliche Nährstoffgehalte in den Pflanzen und deren Entzüge aus dem Boden getroffen werden.

Im Sommeranbau 2014 erhielten die Lysimeter 29 und 30 eine Düngung von 80 kg N/ha und die Lysimeter 116 und 117 120 kg N/ha. Daraus ergeben sich die in Abbildung 9-6 dargestellten Wachstumsverläufe. Nach der Aussaat am 15.04.14 wurde der Feldaufgang am 23.04.14 vermerkt. Bis zur Blüte am 14.07.14 konnte tägliche Zuwachsraten von 1,9 (80 kg N/ha) bzw. 2,4 cm (120 kg N/ha) berechnet werden. Die Hauptwachstumszeit liegt im Juni. Der Wachstumsverlauf innerhalb der Düngevarianten zeigt keine signifikanten Unterschiede, so dass die Messwiederholungen wieder in einem Diagramm zusammengefasst wurden (Anhang 61). Die mit 120 kg N/ha gedüngten Lysimeter brachten signifikant höhere Pflanzenlängen hervor ( $p \leq 0,001^{***}$ ). Wie bereits im Winteranbau 2013/14 blieben die Pflanzen des Sommeranbaus deutlich hinter den Wuchshöhen des Feldversuchs zurück, bei dem Pflanzenlängen von 329 cm (Lärz) und 215 cm (Versmold) erfasst werden konnten.



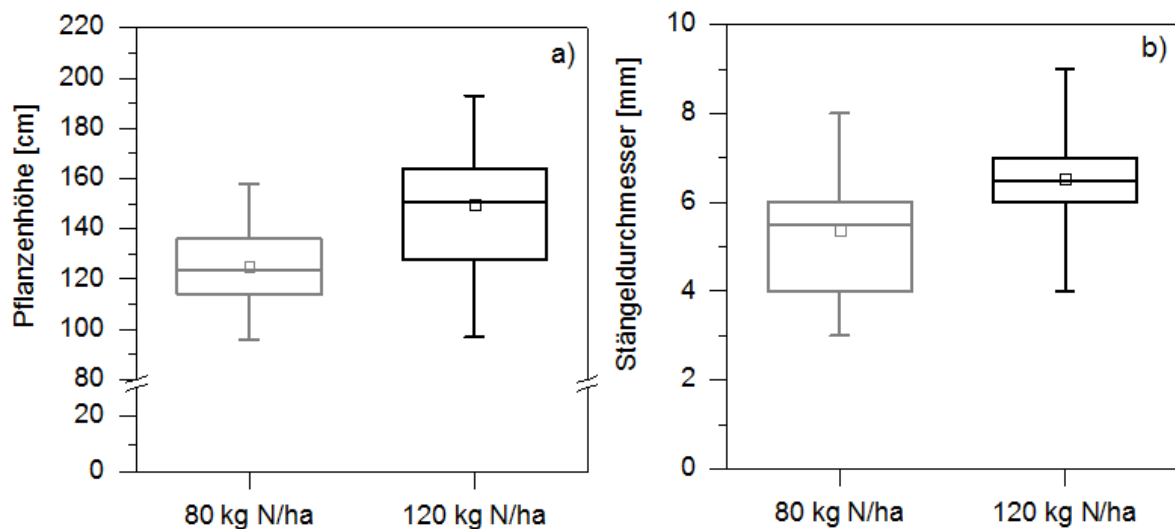
**Abbildung 9-6: Pflanzenhöhen der mit 80 kg N/ha (a) und 120 kg N/ha (b) gedüngten Lysimeter, Sommeranbau 2014**

Am 29.07. 2014 wurden die beiden mit 80 kg N/ha gedüngten Lysimetern (Nr. 29 und 30) vorzeitig geerntet, um auf diesen Lysimetern einen weiteren Anbau von Hanf über den Winter zu ermöglichen. Von der Aussaat bis zur Ernte standen den Pflanzen eine Wärmesumme von 1616,7°C und eine Niederschlagssumme von 246,8 mm für das Wachstum zur Verfügung. Pro Lysimeter bzw. Quadratmeter wurden 128 und 132 Pflanzen ausgezählt. Diese hatten eine durchschnittliche Höhe von 125 cm und einen Stängeldurchmesser von 5,4 mm (Abbildung 9-7). Die mit 120 kg N/ha gedüngten Lysimeter (Nr. 116 und 117) wurden zur gleichen Zeit wie die Handernten des Feldversuches am 27.08.14 geerntet und blieben bis zur Aussaat des Sommerroggens im folgenden April brach liegen. Aufgrund der längeren Wachstumszeit von 29 Tagen, erhielten die Pflanzen eine Wärmesumme von 2097,6°C und eine Niederschlagssumme von 354,8 mm. Sie wiesen eine Wuchshöhe von 149 cm und einen Durchmesser von 6,5 mm auf (Abbildung 9-7). Pro Quadratmeter wurden 112 und 115 Pflanzen ausgezählt, worüber sich eine mittlere Ausdünnung von 11,3 % ergibt. Die Pflanzenhöhen der geringer gedüngten Lysimeter zeigen eine niedrigere Variabilität in den Messwerten auf, wohingegen die Stängeldurchmesser eine höhere Spannweite in den Messwerten besitzen.



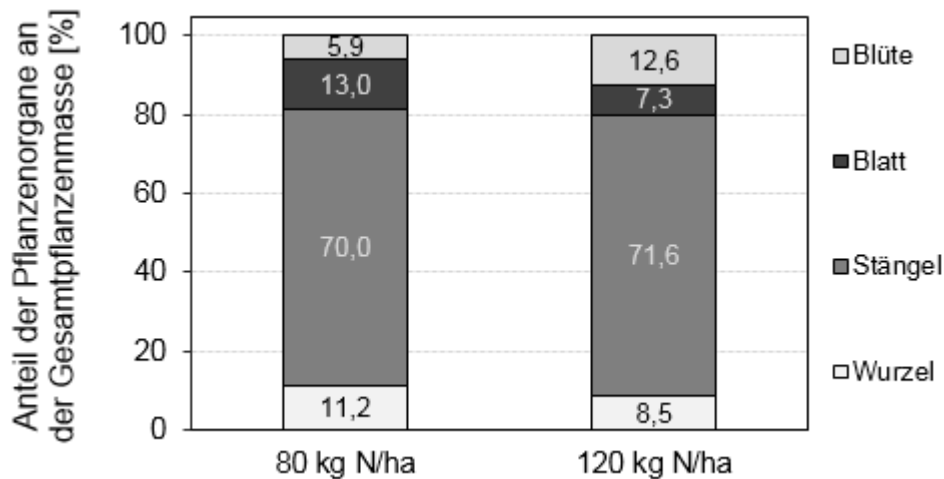
Die Pflanzhöhen sind mit den Stängeldurchmessern korreliert ( $p \leq 0,001$ ,  $R^2 = 0,610$ ,  $n = 58$ ).

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Boniturparameter (Pflanzhöhen, Stängeldurchmesser und Wurzellänge) sind in Anhang 61 aufgeführt. Nachdem es unter den Wiederholungen keine statistischen Unterschiede gab, wurden alle Werte einer Düngevariante gegen die der anderen getestet. Die Düngemenge beeinflusst dabei signifikant die getesteten Merkmale ( $p \leq 0,001^{***}$ ). Wie auch im Feldversuch besteht im Lysimeteranbau eine starke Korrelation zwischen der Pflanzhöhe und dem Stängeldurchmesser berechnet werden ( $p \leq 0,001$ ;  $R^2 = 0,640$ ,  $n = 30$ ).



**Abbildung 9-7: Box-Whisker-Plot der Pflanzhöhe (a) und des Stängeldurchmessers (b) der unterschiedlich gedüngten Lysimeter, Sommeranbau 2014**

Die prozentualen Anteile der verschiedenen Pflanzenorgane am Gesamtpflanzengewicht sind in Abbildung 9-8 als gestapelte Säulen dargestellt. Die mit 80 kg Stickstoff/ha gedüngten Varianten bilden mehr Blatt- und Wurzelmasse aus, wohingegen in der höher gedüngten Variante mehr Blüten- und Stängelmasse produziert wird. Die Unterschiede sind womöglich über die verschiedenen Erntezeitpunkte, aufgrund der erneuten Aussaat des Hanfes auf den beiden ungedüngten Lysimetern, begründet. Zu dem früheren Zeitpunkt bildeten die Pflanzen weniger Blütenmasse aus. Zu dem späteren Erntetermin der beiden mit 120 kg N/ha gedüngten Lysimeter, waren die Blüten stärker entwickelt und die Samenreife setzte bereits ein. Die Blätter gehen zugunsten der Samenausbildung zurück und beginnen abzusterben und abzufallen. Auffallend ist generell der geringe Blattmassenanteil der Hanfpflanzen des Lysimeteranbaus gegenüber den Pflanzen im Feldversuch. In der hohen Düngevariante wurde sogar mehr Blüten- als Blattmasse entwickelt. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die hohe Anzahl an Pflanzen pro Quadratmeter durch die geringe Selbstaussdünnung. Dadurch hat die einzelne Pflanze weniger Platz um Blätter auszubilden und wächst wegen der Konkurrenz um Licht in die Höhe. Die Blattmasse blieb zugunsten der Stängelmasse zurück, wodurch deren prozentualer Anteil anstieg.



**Abbildung 9-8: Anteil der Pflanzenorgane am Gesamtpflanzengewicht auf den unterschiedlich gedüngten Lysimetern, Sommeranbau 2014**

In den einzelnen Pflanzenteilen des Sommeranbaus 2014 konnten in der niedrigen Düngevariante für Stickstoff und Phosphor höhere Nährstoffgehalte ermittelt werden, wohingegen in der hohen Düngevariante mehr Kalium eingelagert wurde (Anhang 62). Jedoch ist auch hier zu beachten, dass möglicherweise die unterschiedlichen Erntezeitpunkte die verschiedenen hohen Nährstoffgehalte bedingen. Generell wurden in Blüten und Blättern mehr Nährstoffe gespeichert als in den Stängeln und Wurzeln.

Von den Lysimetern ergeben sich die in Tabelle 9-1 aufgeführten Erträge und Nährstoffentzüge durch die Pflanzen, hochgerechnet auf Dezitonnen pro Hektar. Die mit 80 kg N/ha gedüngten Lysimeter brachten einen Gesamtertrag von 105,5 dt/ha hervor, welches einem Strohertrag von 73,9 dt/ha entspricht. Von den mit 120 kg N/ha gedüngten Lysimetern wurden ein Gesamtpflanzenenertrag von 177,1 dt/ha und ein Strohertrag von 127 dt/ha erhoben. Die Düngemenge für die niedrigere Düngevariante belief sich auf 80 kg N, 13 kg P und 91 kg K/ha. Über die Nährstoffgehalte der Pflanzen wurde dem Boden in der niedrigeren Düngevariante 60,6 kg Stickstoff und 5,7 kg Phosphor pro Hektar mehr entzogen, als über die Düngung zugeführt wurde. Für Kalium besteht ein leichter Überschuss von 3,8 kg pro Hektar. In der höheren Düngevariante wurden 120 kg N, 19,5 kg P und 136,5 kg K/ha aufgebracht. Die Nährstoffentzüge durch die Pflanzen liegen hier für alle drei Hauptnährstoffe deutlich über der aufgebrauchten Düngemenge. Danach ergibt sich ein Defizit von 91,3 kg N, 11,5 kg P und 34,3 kg K pro Hektar entzogen. Allerdings muss beachtet werden, dass die niedriger gedüngten Lysimeter 29 Tage eher abgeerntet wurden, wodurch die Pflanzen möglicherweise weniger Nährstoffe aus dem Boden aufnahmen als die höher gedüngten Lysimeter mit einer längeren Wachstumszeit.



**Tabelle 9-1: Erntemengen und Nährstoffentzüge durch die Pflanzen auf den Lysimetern, Sommeranbau 2014**

<i>Düngung</i>		<i>Erntemenge</i>	<i>N-Entzug</i>	<i>P-Entzug</i>	<i>K-Entzug</i>
<i>[kg N/ha]</i>		<i>[dt/ha]</i>	<i>[kg/ha]</i>		
80	Blüte	5,9	26,0	3,4	10,9
	Blatt	13,8	42,6	4,3	19,6
	Stängel	73,9	62,5	9,6	48,9
	Wurzel	11,8	9,5	1,5	7,7
	<b>Gesamt</b>	<b>105,5</b>	<b>140,6</b>	<b>18,7</b>	<b>87,2</b>
120	Blüte	22,2	89,0	11,7	45,3
	Blatt	13,0	34,8	3,1	19,4
	Stängel	127,0	77,7	14,7	94,2
	Wurzel	14,9	9,9	1,5	11,8
	<b>Gesamt</b>	<b>177,1</b>	<b>211,3</b>	<b>31,0</b>	<b>170,8</b>

Die Aussaat des Winterhanfes 2014/15 wurde am 30.07.14 auf den beiden zuvor geräumten Lysimetern des Sommeranbaus aus der niedriger gedüngten Variante (Lysimeter 29 und 30) durchgeführt. Die Düngemenge von 80 kg Stickstoff pro Hektar wurde beibehalten. Die Pflanzen liefen, trotz vorheriger guter Keimprobe des Saatgutes, sehr schlecht auf, woraufhin Saatgut nachgelegt werden musste. Zur Ernte der Pflanzen am 03.02.15 konnten nur 81 bzw. 44 Pflanzen pro Quadratmeter gezählt werden. Trotz der unterschiedlichen Pflanzenzahl konnte zwischen den beiden Lysimeter kein statistisch belegbarer Unterschied in Bezug auf die bonitierten Pflanzenparameter nachgewiesen werden. Die Pflanzen erreichten eine durchschnittliche Höhe von 62,3 cm mit einem Stängeldurchmesser von 3,6 mm. Die Wurzellänge betrug im Mittel 8,5 cm. Für die Hauptwachstumszeit von der Aussaat bis Ende September standen den Hanfpflanzen eine Wärmesumme von 996,8°C und eine Niederschlagsmenge von 145,8 mm für das Pflanzenwachstum zur Verfügung.

**Tabelle 9-2: Pflanzenbonituren der Lysimetern, Winteranbau 2014/15**

<i>Lys.-Nr.</i>	<i>Pflanzenhöhe</i>			<i>Stängeldurchmesser</i>			<i>Wurzellänge</i>			<i>n</i>
	<i>M</i>	<i>Mdn</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>Mdn</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>Mdn</i>	<i>SD</i>	
29	66,5	69,0	18,2	3,4	4,0	1,0	8,1	9,0	3,2	15
30	58,1	59,0	17,0	3,8	3,5	1,3	8,9	8,0	4,0	15

Die Korrelation zwischen der Pflanzenhöhe und dem Stängeldurchmesser wird als schwach eingestuft ( $p = 0,002$ ,  $R^2 = 0,415$ ,  $n = 17$ ). Der errechnete Hanfstrohertrag pro Hektar ist aufgrund der Pflanzenzahlen pro Quadratmeter sehr unterschiedlich und beträgt 13,7 dt (Lys. 29) bzw. 9,1 dt/ha (Lys. 30).

## 9.3 Sickerwasser

### 9.3.1 Sickerwassermengen

Zum Vergleich der Sickerwasser- und Nährstoffmengen wurden neben den vier mit Hanf angebauten Lysimeter, zwei Lysimeter die seit 2009 als Schwarzbrache geführt werden, herangezogen (Lys. 20 und 107). Diese werden nicht gedüngt und das ganze Jahr über frei von Pflanzenbewuchs gehalten. Sie geben Aufschluss über die maximale Sickerwassermenge, da ein Bewuchs die Höhe des Sickerwassers durch Bedeckung und Transpiration durch die Pflanzen mindert.

Die beiden Lysimeter mit der jeweils gleichen Düngung/Anbauvariante zeigen im Trend ein unterschiedliches Abflussverhalten bzw. unterschiedlich hohe Nährstoffkonzentrationen, der jedoch nicht signifikant ist (Anhang 63). Aufgrund der bestehenden Unterschiede werden in der folgenden Ergebnisauswertung die Wiederholungen der Lysimeter jeweils einzeln betrachtet und dargestellt.

Die Niederschlags- und Sickerwassermengen der jeweiligen Lysimeter sind in Abbildung 9-9 dargestellt. Darin sind die Sickerwassermengen auf der primären y-Achse aufgetragen, die Niederschlagsmengen sind auf der sekundären y-Achse angeordnet. Die einzelnen Anbauphasen des Hanfes sind als grauer Kasten gekennzeichnet. Die ebenfalls grau hinterlegten Legenden beziehen sich auf die jeweilige Anbauphase, da unterschiedliche Düngegaben aufgebracht wurden. Der betrachtete Zeitraum geht von August 2013 bis März 2015 und umfasst somit 20 Monate.

Die beiden Schwarzbrache-Lysimeter (Lys. 20 und 107) liefern über den gesamten Versuchszeitraum monatlich Sickerwasser, wobei sich deren Sickerwassermengen nicht signifikant voneinander unterscheiden (Anhang 67). Die Höhe der Sickerwassermengen folgt dabei dem jahreszeitlichen Verlauf der Niederschläge, woraus sich eine mittel-starke Korrelation ergibt (Lys. 20:  $p = 0,007$ ,  $R^2 = 0,403$ ,  $n = 20$ , Lys. 107:  $p = 0,035$ ,  $R^2 = 0,471$ ,  $n = 20$ ) (Anhang 63). In die statische Auswertung konnten nur die beiden geringer gedüngten Lysimeter (29 + 30) aufgenommen werden, da die beiden höher gedüngten Lysimeter an zu wenigen Monaten Sickerwasser bildeten, so dass die Wiederholungsanzahl zu gering war (Anhang 64). Für das Lysimeter 29 konnte eine schwache Korrelation zwischen Niederschlags- und Sickerwassermenge festgestellt werden ( $p = 0,017^{**}$ ,  $R^2 = 0,117$ ,  $n = 20$ ) (Anhang 63). Für das Lysimeter 30 konnte dagegen kein Zusammenhang zwischen Niederschlags- und Sickerwassermenge nachgewiesen werden. Die beiden Schwarzbrache-Lysimeter bringen signifikant mehr Sickerwasser hervor als die mit Hanf bepflanzten Lysimeter 29 und 30 (Anhang 64). Aus den höher gedüngten Hanflysimeter 116 und 117 konnte erst im Februar 2015 Sickerwasser aufgefangen werden.

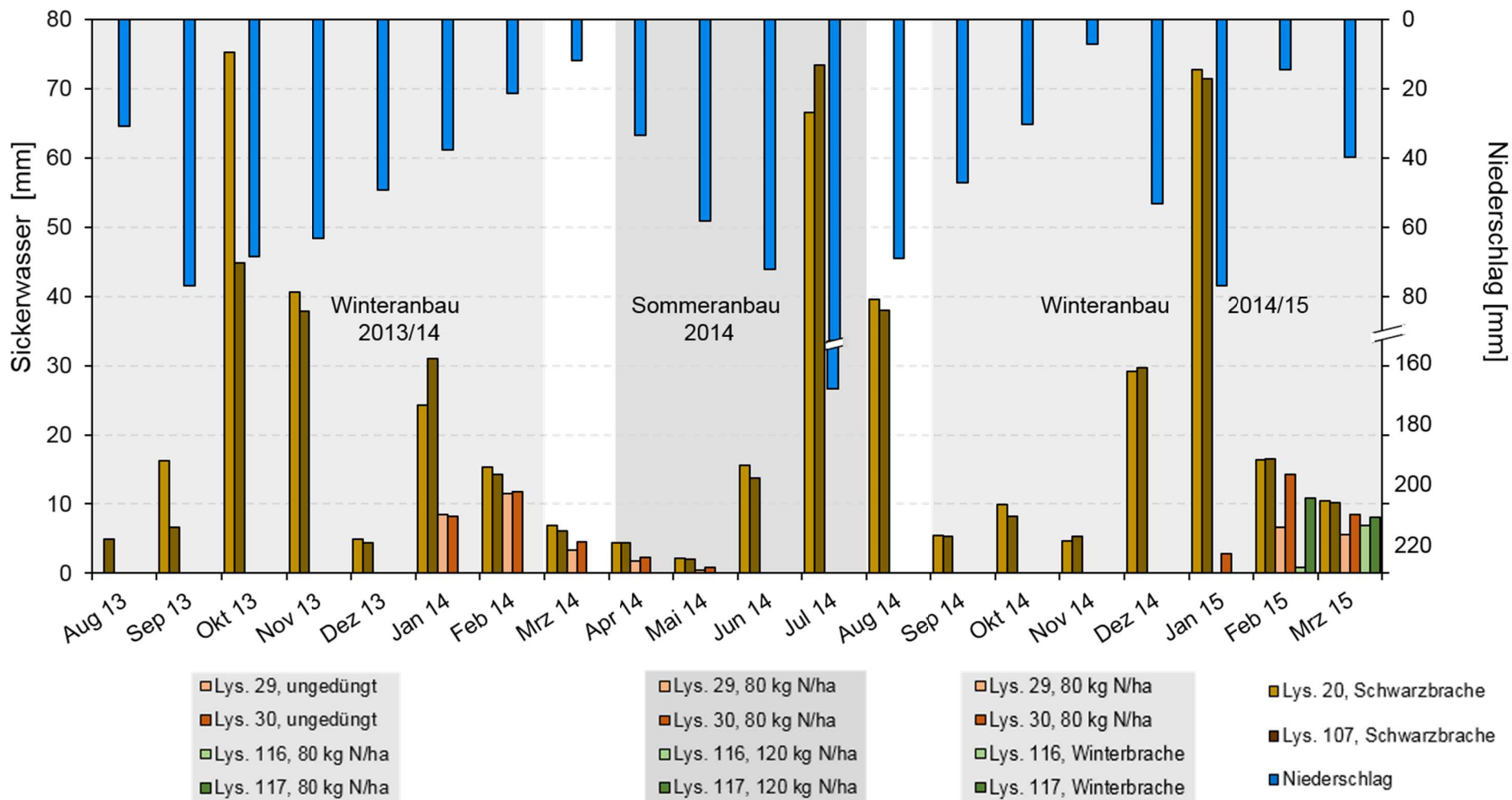


Abbildung 9-9: Niederschlag und Abfluss der mit Hanf bestellten Lysimeter im Vergleich zum Abfluss der Schwarzbrache-Lysimeter

Für den Winteranbau 2013/14 ergibt sich für den Zeitraum von August 2013 bis März 2014 eine Niederschlagsmenge von 359,5 mm. Die beiden Schwarzbrache-Lysimeter liefern für diesen Zeitraum 183,4 mm (Lys. 20) und 150 mm (Lys. 107) Sickerwasser, dies entspricht einem Sickerwasseranteil am Niederschlag von 51,0 bzw. 41,7 %. Während der Wachstumszeit des Hanfes im Winteranbau 2013/14 (August bis Oktober) wurde unter allen Hanflysimetern kein Sickerwasser gebildet. Erst im Januar des Folgejahres, nachdem die Pflanzen über den Winter abgestorben waren und kein Wasser mehr aufnehmen konnten, konnte aus den ungedüngten Lysimetern 23,3 mm (Lys. 29) und 24,5 mm (Lys. 30) Sickerwasser aufgefangen werden. Dieses entspricht einem Sickerwasseranteil am Niederschlag von 6,5 bzw. 6,8 %. Die mit 80 kg N/ha gedüngten Lysimeter brachten dagegen kein Sickerwasser hervor.

Im Sommeranbau 2014 konnte nur in den Monaten April und Mai, in denen sich die Hanfpflanzen in der Jugendentwicklung befanden und noch nicht in die schnelle Wachstumsphase übergegangen waren, aus den mit 80 kg N/ha gedüngten Lysimetern 2,2 (Lys. 29) und 3,3 mm (Lys. 30) Sickerwasser aufgefangen werden. Die mit 120 kg N/ha gedüngten Lysimeter brachten während des gesamten Sommeranbaus (April bis August) kein Sickerwasser hervor. Der Juli 2014 war mit 172,6 mm sehr niederschlagsreich und generierte in den Schwarzbrache-Lysimetern eine Sickerwassermenge von 66,6 (Lys. 20) und 73,4 mm (Lys. 107). Die Hanflysimeter reagierten dagegen nicht mit zusätzlicher Sickerwasserbildung, resultierend aus den erhöhten Niederschlägen im Juli. Für den gesamten Sommeranbau 2014 wurde aus den Schwarzbrache-Lysimetern 128,4 mm (Lys. 20) und 131,6 mm (Lys. 107) aufgefangen, welches einem Sickerwasseranteil von 31,6 und 32,4 % des Niederschlages entspricht. Aufgrund von höheren Temperaturen und daraus resultierenden höheren Verdunstungsraten waren die Sickerwassermengen im Sommer niedriger als im Winter.

Im Winteranbau 2014/15 konnte unter den beiden Hanflysimetern 20,9 mm (Lys. 29) und 33,1 mm (Lys. 30) Sickerwasser gemessen werden, welches einen Anteil von 7,1 (Lys. 29) und 11,3 % (Lys. 30) der Niederschlagsmenge ausmachte. Die beiden Lysimeter, die zuvor mit 120 kg N/ha gedüngt wurden, lagen seit der Ernte des Hanfes aus dem Sommeranbau von Ende August 2014 bis Anfang März 2015 brach. Trotz der Brache konnten erst im Februar des Folgejahres Sickerwassermengen von 15,5 mm (Lys. 116) und 26,9 mm (Lys. 117) aufgefangen werden, welches Sickerwasseranteil von 5,3 und 9,2 % am Niederschlag entspricht. Somit verhielten sich die Lysimeter ähnlich denen, die mit Hanf über den Winter 2014/15 bestellt waren. Aufgrund der geringen Messwerte konnte dies jedoch nicht statistisch überprüft werden. Die Sickerwassermengen der beiden Schwarzbrache-Lysimeter sind mit 161,0 mm (Lys. 20) und 157,4 mm (Lys. 107) signifikant höher als die der Hanf-Lysimeter. Die Anteile am Niederschlag liegen bei 55,0 bzw. 53,8 %.

Über den gesamten Zeitraum von August 2013 bis Mai 2015 fielen 1034,2 mm Niederschlag, von dem 460,7 mm (Lys. 20) und 428,2 mm (Lys. 107) durch die Schwarzbrachen als Sickerwasser aufgefangen wurde. Dies entspricht einem Sickerwasseranteil von 44,5 und 41,4 %

am Niederschlag. Aus den Lysimetern 29 und 30 bildete sich aus 3,7 % bzw. 5,2 % des Niederschlags 37,8 mm und 53,3 mm Sickerwasser. Die geringsten Sickerwassermengen wurden von den Lysimetern 116 (7,7 mm) und 117 (19,0 mm) aufgefangen, die während des Versuches stets die höhere Düngengebe erhielten und dadurch höhere Pflanzen ausbildeten, welche mehr Wasser verdunsteten. Der Anteil des Sickerwassers an der Niederschlagsmenge betrug nur 0,7 bzw. 1,8 %.

Neben den beiden Schwarzbrache-Lysimetern wurden als Vergleich zum Hanfanbau die Sickerwassermengen von vier Lysimetern des Teilversuches „Integrierter Landbau“ betrachtet (Anhang 68). Zwei Lysimeter (Lys. 21 und 22) waren über den Vergleichszeitraum von August 2013 bis März 2015 mit der Anbaufolge: Mais – Zuckerrüben – Winterweizen belegt. Auf zwei weiteren Lysimetern (Lys. 25 und 26) kamen Ölrettich, als abfrierende Stoppelfrucht, Mais und Zuckerrüben zum Anbau. Zwischen dem Mais- und Zuckerrübenanbau lagen die entsprechenden Lysimeter über den Winter brach. Aus der Fruchtfolge Mais – Zuckerrüben – Winterweizen (Lysimeter 21 und 22) konnte 52,1 und 93,6 mm Sickerwasser aufgefangen werden, welches einem Sickerwasseranteil von 5,0 bzw. 9,1 % der Niederschlagsmenge entspricht. Die Fruchtfolge Ölrettich – Mais – Zuckerrüben (Lysimeter 25 und 26) gaben eine Sickerwassermenge von 128,0 und 116,1 mm ab, mit Sickerwasseranteilen von 12,4 und 11,2 %. Zwischen den einzelnen Wiederholungen, sowie zwischen den beiden verschiedenen Fruchtfolgen des Integrierten Anbaus konnten keine statistischen Unterschiede in Bezug auf die Sickerwassermenge erhoben werden. Im Vergleich zu den Sickerwassermengen der Schwarzbrachen konnte nur für das Lysimeter 21 (Fruchtfolge: Mais – Zuckerrüben – Winterweizen) ein signifikanter Unterschied bestätigt werden, welches über den Zeitraum von August 2013 bis März 2015 am wenigsten Sickerwasser lieferte (Anhang 68).

Die Sickerwassermengen der Hanflysimeter mit der geringeren Düngemenge (Lys. 29 und 30) und der der Lysimeter des Integrierten Landbaus weisen keine statistischen Unterschiede auf. Aufgrund der zu geringen Anzahl an sickerwasserführenden Monaten der höher gedüngten Hanflysimeter (Lys. 116 und 117), konnte keine statistische Auswertung gegenüber den Lysimetern des Integrierten Landbaus durchgeführt werden (Anhang 64).

### 9.3.2 Nährstoffkonzentrationen

Die Nährstoffkonzentrationen an Nitrat-Stickstoff, Phosphor (gesamt) und Kalium in Milligramm pro Liter der monatlichen Sickerwassermengen von den Schwarzbrachen sowie der Hanflysimeter sind in Abbildung 9-10 dargestellt. Während die Konzentrationen von Kalium und Phosphor Werte von 5 mg/l nicht überschreiten, nehmen die Konzentrationen des NO<sub>3</sub>-N deutlich höhere Werte ein. Ebenfalls zeigen sie einen jahreszeitlichen Verlauf und weisen im Frühjahr, in den Monaten Februar und März, die höchsten Konzentrationen auf. Die NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen im Sickerwasser der Schwarzbrachen sind signifikant höher als die der Hanflysimeter ( $p \leq 0,001^{***}$ ). Die höchsten Nitrat-Stickstoffkonzentrationen wurden im

März 2014 mit bis zu 93,9 mg/l (Abbildung 9-10 b) erreicht. Insbesondere das Schwarzbrache-Lysimeter 107 (b) zeigt im Verlauf der  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen einen gegenläufigen Trend zu der Höhe der Sickerwassermenge: je niedriger der Sickerwasseraustrag, desto höher die Konzentrationen. Eine Korrelation zwischen Sickerwassermenge und  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration konnte nicht festgestellt werden. Die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen der beiden höher gedüngten Hanflysimeter 116 und 117(e + f) sind im Frühjahr 2015 im Trend höher als die der beiden geringer gedüngten Hanflysimeter (c + d). Die beiden geringer gedüngten Hanflysimeter unterscheiden sich in Bezug auf die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen signifikant voneinander ( $p = 0,021^*$ ), wobei das Lysimeter 30 geringere  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration aufweist. Die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen von Lysimeter 116 (e) erreichen mit über 60 mg/l im Frühjahr 2015 ähnliche Werte wie die der Schwarzbrachen. Aufgrund der geringen Messwiederholungen konnte diesbezüglich keine statistische Auswertung durchgeführt werden. Die Phosphorkonzentrationen aller Lysimeter weisen stets Werte unter 1 mg/l auf und unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Sie sowie die Kaliumkonzentrationen folgen keinem jahreszeitlichen Trend, ebenso wenig hatte die Sickerwassermenge einen Einfluss auf die Höhe der Konzentration. Die K-Konzentrationen der Schwarzbrachen und der geringer gedüngten Hanflysimeter liegen unter 5 mg/l. Nur zwischen dem Schwarzbrache-Lysimeter 20 und dem Hanflysimeter 30 mit geringerer Düngung konnte ein statistisch belegbarer Unterschied bezüglich der K-Konzentrationen festgestellt werden ( $p = 0,034^*$ ). Im Sickerwasser der beiden höher gedüngten Lysimeter konnten im Frühjahr 2015 leicht erhöhte Kaliumkonzentrationen bis zu 9,1 mg/l gemessen werden. Zwischen den K- und  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen der Schwarzbrachen (20 und 107) und dem Hanflysimeter 29 konnten Korrelationen nachgewiesen werden, die jedoch als sehr schwach eingestuft werden (Anhang 65).

Die Lysimeter des Integrierten Landbaus weisen innerhalb der Wiederholungen keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Nährstoffkonzentrationen auf (Anhang 69). Gegenüber den weiteren Lysimetern konnte kein einheitlicher Trend für die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen festgestellt werden. Es konnten nicht signifikante und signifikante Unterschiede der Lysimeter des Integrierten Landbaus gegenüber den Schwarzbrachen und den beiden geringer gedüngten Hanflysimetern erhoben werden. Dagegen konnten zwischen den P-Konzentrationen aller Lysimeter keine statistisch belegbaren Unterschiede bestimmt werden. Für die Kaliumkonzentrationen konnte nur zwischen den Lysimetern 20 (Schwarzbrache) und 30 (Hanf, geringere Düngung), sowie Lysimeter 107 (Schwarzbrache) und 21 (Fruchtfolge: Mais – Zuckerrüben – Winterweizen) ein signifikanter Unterschied ermittelt werden (Anhang 67).

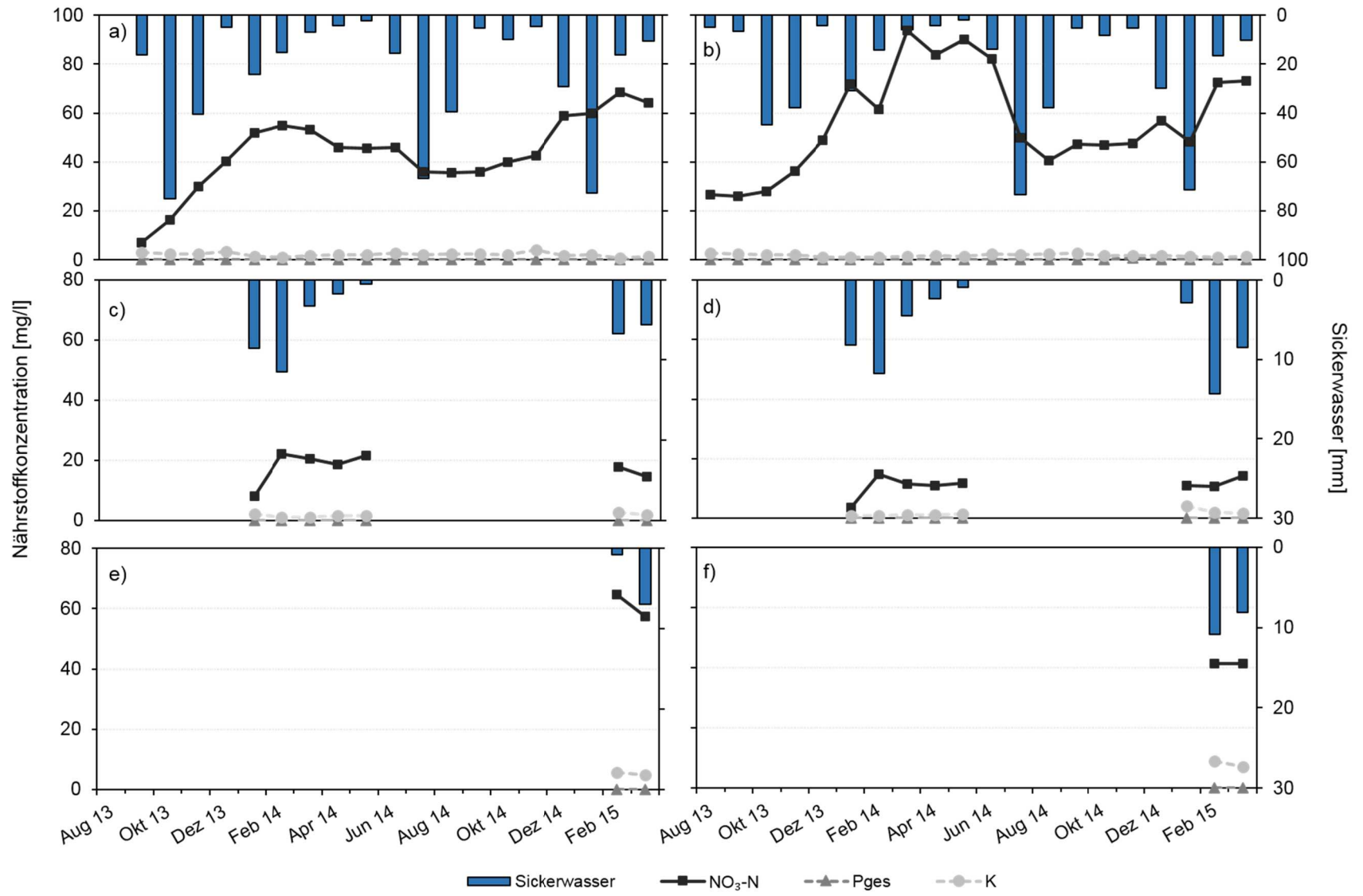


Abbildung 9-10: Nährstoffkonzentrationen und Sickerwassermengen der Lysimeter

### 9.3.3 Nährstoffgehalte

Für die Berechnung der Nährstoffgehalte in Kilogramm pro Hektar wurden die Nährstoffkonzentrationen mit den Sickerwassermengen multipliziert und auf die Fläche hochgerechnet. Die Ergebnisse der beiden Schwarzbrachen und der vier Hanflysimeter sind in Abbildung 9-11 aufgetragen. Die höchsten Stoffausträge und möglichen potentiellen Einträge in das Grundwasser stammen aus dem Nitrat-Stickstoff. Es besteht eine Korrelation zwischen den Nitrat-Stickstoff-Austrägen und der Sickerwassermenge (Anhang 66). Die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Austräge sind signifikant höher als die der beiden niedriger gedüngten Hanflysimeter (Lys. 29 und 30) ( $p \leq 0,001^{***}$ ). Die beiden höher gedüngten Lysimeter (Lys. 116 und 117) konnten aufgrund der wenigen sickerwasserführenden Monate nicht in die statistische Auswertung einbezogen werden (Anhang 64). Die Kaliumgehalte zeigen deutlich geringere Werte als die Stickstoffgehalte auf und liegen stets unter 1 kg K/ha und Monat. Dabei geben die beiden geringer gedüngten Hanflysimeter (Lys. 29 und 30) signifikant weniger Kalium ab als die beiden Lysimeter der Schwarzbrache. Zwischen den Phosphorausträgen der verschiedenen Lysimetern gibt es keine statistischen Unterschiede (Anhang 67). Sie betragen in der Summe über den gesamten Zeitraum jeweils unter 1 kg P/ha und korrelieren nicht mit der Höhe der Sickerwassermenge (Anhang 66).

Wie die Sickerwassermengen wurden auch die Nährstoffgehalte aus dem Hanfanbau mit jeweils zwei Wiederholungen des Teilprojektes „Integrierter Landbau“ verglichen (Anhang 70). In Bezug auf die betrachteten Hauptnährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium konnten zwischen den Hanflysimetern der geringeren Düngung (die höher gedüngten Hanflysimeter konnten aufgrund der geringen Datenmengen nicht statistisch betrachtet werden) und den Lysimetern des Integrierten Landbaus mit der Fruchtfolge Mais – Zuckerrüben – Winterweizen sowie Ölrettich – Mais – Zuckerrüben keine statistischen Unterschiede festgestellt werden. Die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte der Lysimeter des Integrierten Landbaus weichen bis auf Lysimeter 22 signifikant von denen der Schwarzbrache ab (Anhang 67).



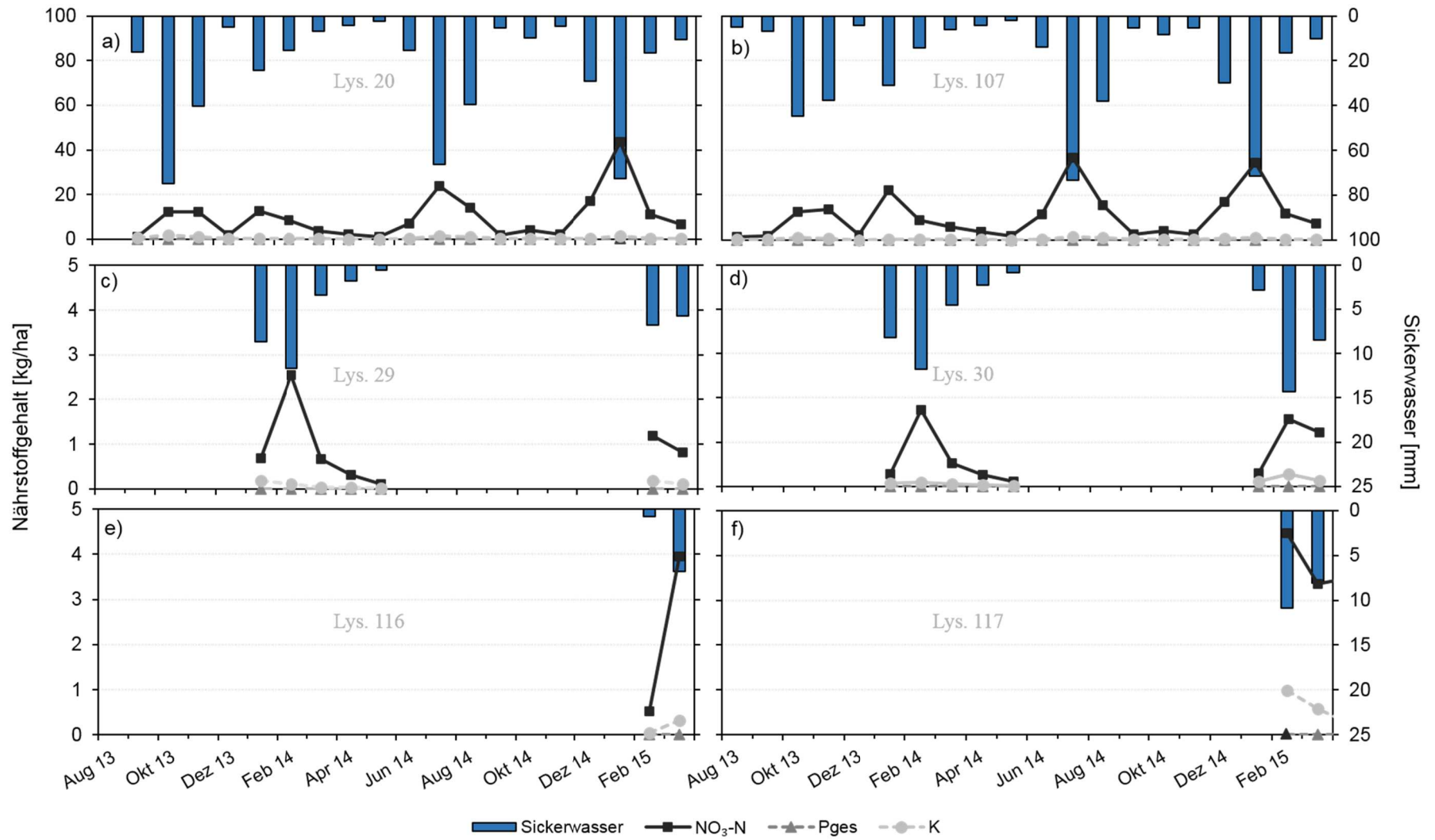


Abbildung 9-11: Sickerwassermengen und Nährstoffausträge der verschiedenen Lysimeter

In Tabelle 9-3 sind die Sickerwassermengen und Nährstoffausträge über den gesamten Versuchszeitraum (Aug 13 - Mrz 15 = 20 Monate) zusammengefasst. Die detaillierte Untergliederung nach den einzelnen Anbauphasen ist im Anhang 71 dargestellt. Bei einer Niederschlagsmenge von 1034,2 mm konnten davon 460,7 bzw. 428,2 mm Sickerwasser in den Schwarzbrachen generiert werden. Die mit Hanf bestellten Lysimeter lieferten demgegenüber deutlich wenig Sickerwasser. Während aus den Schwarzbrache-Lysimetern monatlich Sickerwasser aufgefangen werden konnten, brachten die beiden geringer gedüngten Lysimeter an 7 bzw. 8 Monaten Sickerwasser mit Mengen von 37,8 bzw. 53,3 mm Sickerwasser hervor. Die höher gedüngten Lysimeter gaben nur an 2 Monaten des 20 monatigen Versuchszeitraum Sickerwasser ab, wodurch sie nicht in die statistische Auswertung einbezogen werden konnten.

In der Summe sind die Nährstoffausträge über den gesamten Versuchszeitraum aus den Schwarzbrachen deutlich höher als die der mit Hanf bestellten Lysimetern und die der Fruchtfolge des Integrierten Landbaus. Die Phosphorausträge liegen bei allen Lysimetern unter 1 kg/ha. Die Fruchtfolge des Integrierten Landbaus mit Mais – Zuckerrüben – Winterweizen gibt mehr Nitrat-Stickstoff frei als die Fruchtfolge mit Ölrettich – Mais – Zuckerrüben. Allerdings muss beachtet werden, dass diese Fruchtfolge auch eine höhere Stickstoffdüngung erhielt, als die Fruchtfolge mit Ölrettich.

**Tabelle 9-3: Sickerwassermengen und Nährstoffausträge der Lysimeter über den gesamten Versuchszeitraum**

<i>Lysimeter-Nr.</i>	<i>Anbau</i>	<i>Düngung</i>	<i>Sickerwasser</i>	<i>NO<sub>3</sub>-N</i>	<i>P<sub>t</sub></i>	<i>K</i>
		<i>[kg N/ha]</i>	<i>[mm]</i>		<i>[kg/ha]</i>	
29	Hanf	- /80/80	37,8	6,3	0,004	0,6
30	Hanf	- /80/80	53,3	5,9	0,006	0,8
116	Hanf	80/120/-	7,7	4,5	0,002	0,4
117	Hanf	80/120/-	19,0	7,9	0,010	1,6
20	Schwarzbrache	-	460,7	186,7	0,129	9,6
107	Schwarzbrache	-	428,2	216,7	0,101	7,7
21	Mais-ZR-WW	180/145/120	52,1	23,7	0,005	1,6
22	Mais-ZR-WW	180/145/120	93,6	33,2	0,012	1,9
25	ÖR-Mais-ZR	- /180/145	128,0	11,5	0,015	2,2
26	ÖR-Mais-ZR	-/180/145	116,1	7,7	0,010	2,3

## 10 Einfrierversuch

Für den Einfrierversuch wurden Hanfpflanzen des Winteranbaus, die noch keinem Frost ausgesetzt waren, Anfang November geerntet. Die Proben waren bereits im Bestand abgestorben und vollständig entlaubt. Im Labor wurden die Proben in mehrere Teilproben unterteilt, die anschließend unterschiedliche lange im Tiefkühlschrank eingefroren bzw. wieder aufgetaut wurden. Zuvor wurden sie mit einer Sprühflasche leicht befeuchtet, um die natürlichen Herbst-/Winterbedingungen zu simulieren. Auch unter Feldbedingungen haben die Hanfstängel durch Niederschläge eine gewisse Feuchte, bevor sie dem Frost ausgesetzt sind.

Während des Versuches wurden folgende Probenbezeichnungen verwendet:

- Kein Frost = Ausgangsprobe
- 1 W. Frost = 1 Woche eingefroren bei  $-18^{\circ}\text{C}$  in der Gefriertruhe
- 1 W. Frost-Tau = 1 Woche eingefroren bei  $-18^{\circ}\text{C}$  in der Gefriertruhe und 5 x pro Woche für 8 Stunden im Kühlschrank bei  $4^{\circ}\text{C}$  aufgetaut
- 4 W. Frost = 4 Wochen eingefroren bei  $-18^{\circ}\text{C}$
- 4 W. Frost-Tau = 4 Wochen eingefroren bei  $-18^{\circ}\text{C}$  und 5 x pro Woche für 8 Stunden im Kühlschrank bei  $4^{\circ}\text{C}$  aufgetaut.

Die Ausgangsprobe und die mit Frost behandelten Teilproben wurden bezüglich ihrer Fasereigenschaften an der Fachhochschule Bremen analysiert (Anhang 72).

Die Breite der Faserbündel ist in Abbildung 10-1 dargestellt. Der Mittelwert liegt bei allen Proben zwischen  $55,3\ \mu\text{m}$  und  $66,0\ \mu\text{m}$ . Die Proben zeigen viele Ausreißer mit Maximalwerten zwischen  $600$  und  $950\ \mu\text{m}$ . Die Faserbreite nimmt bei allen eingefrorenen Proben gegenüber der Ausgangsprobe signifikant ab. Bis auf die beiden Proben mit einer bzw. vier Wochen Frost-Tau-Zyklen, weisen die frostbehandelten Proben auch untereinander signifikante Unterschiede auf (Anhang 73).

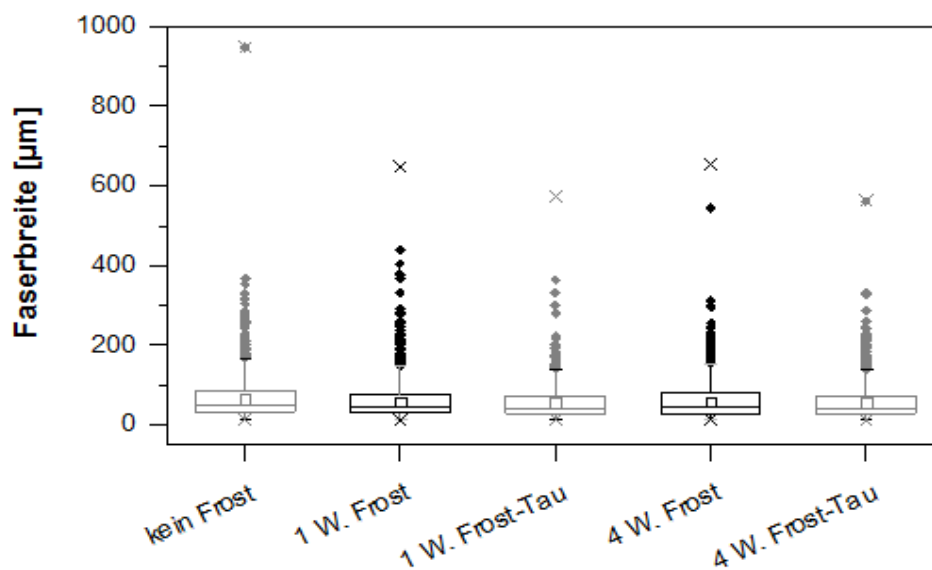


Abbildung 10-1: Box-Whisker-Plot der Faserbreite, Einfrierversuch (Whisker = 1,5-facher IQR, Rauten = Ausreißer, Kreuze = Min- Max)

Die Bruchdehnung nimmt, bis auf die Probe mit einer Woche Dauerfrost, bei allen anderen Proben im Vergleich zur Ausgangsprobe signifikant ab (Abbildung 10-2). Die geringste Bruchdehnung zeigt die Probe mit einer Woche Frost-Tau. Zwischen den frostbehandelten Proben konnten nur zwischen den beiden über vier Wochen eingefrorenen Proben keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden (Anhang 73).

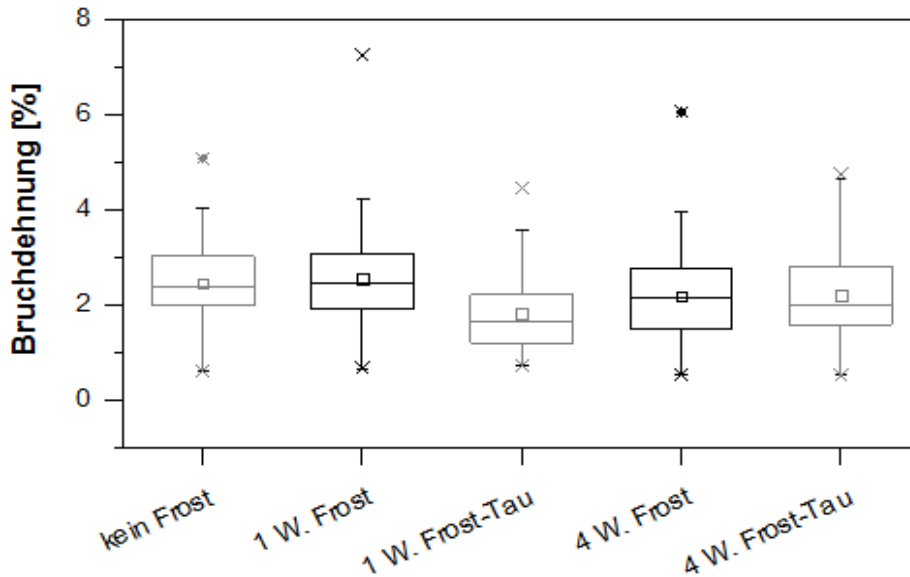


Abbildung 10-2: Box-Whisker-Plot der Bruchdehnung, Einfrierversuch

Ein ähnlicher Trend spiegelt sich bei der Zugfestigkeit wider (Abbildung 10-3). Auch hier nimmt die Zugfestigkeit der Probe mit einer Woche Frost-Tau im Vergleich zur Ausgangsprobe am stärksten ab. Bei allen Proben verringert sich die Zugfestigkeit im Vergleich zur Ausgangsprobe signifikant (Anhang 73).

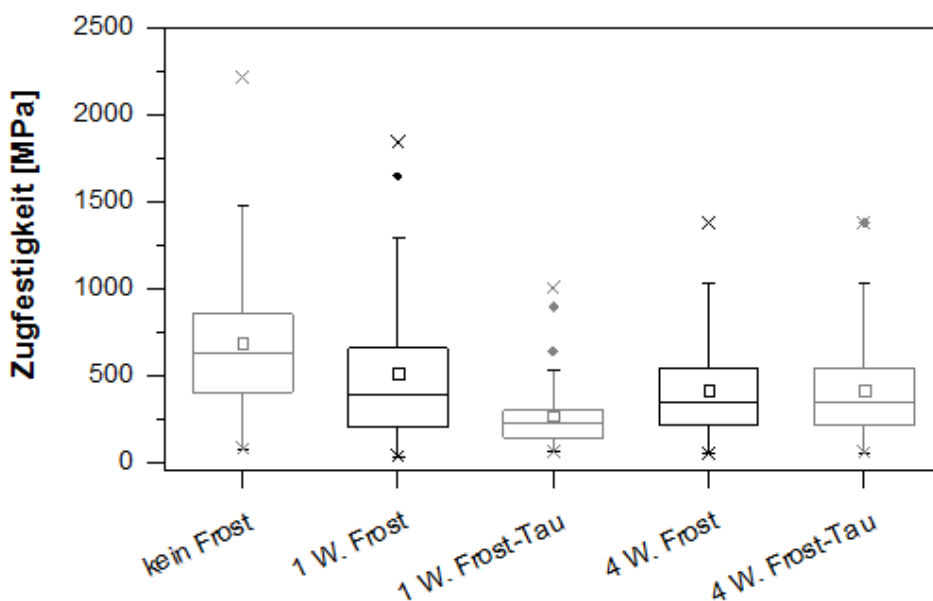


Abbildung 10-3: Box-Whisker-Plot der Zugfestigkeit, Einfrierversuch

Zwischen den dauereingefrorenen Proben von einer und vier Wochen konnte kein signifikanter Unterschied belegt werden. Zwischen allen anderen gibt es statistische belegbare Unterschiede.

Auch der Zugmodul verringert sich signifikant durch die Frostbehandlung (Abbildung 10-4) (Anhang 73). Die Behandlung mit einer Woche Frost und Wiederauftauen hebt sich signifikant zwischen der Probe von 1 Woche und vier Wochen Dauerfrost ab. Die Behandlung von einer im Vergleich zu vier Wochen Einfrieren und Auftauen zeigt keinen Einfluss auf den Zugmodul.

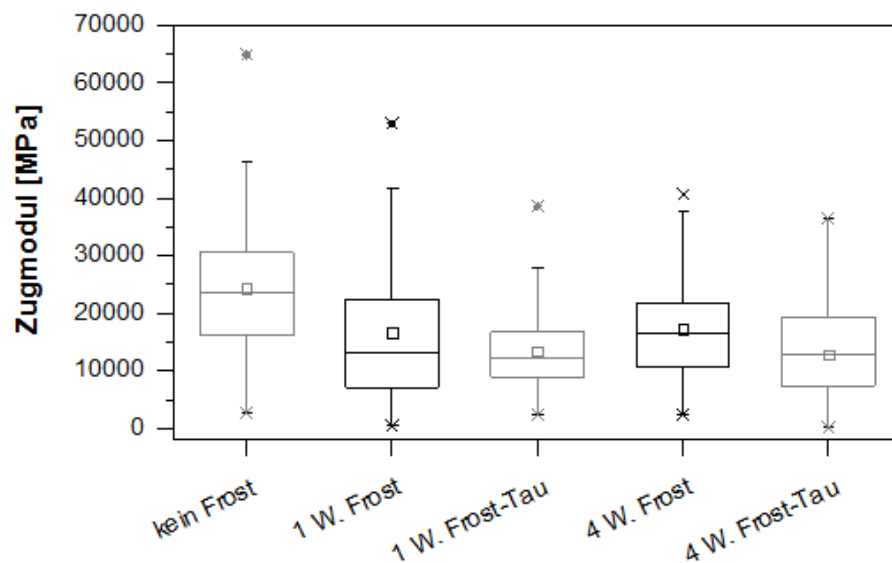


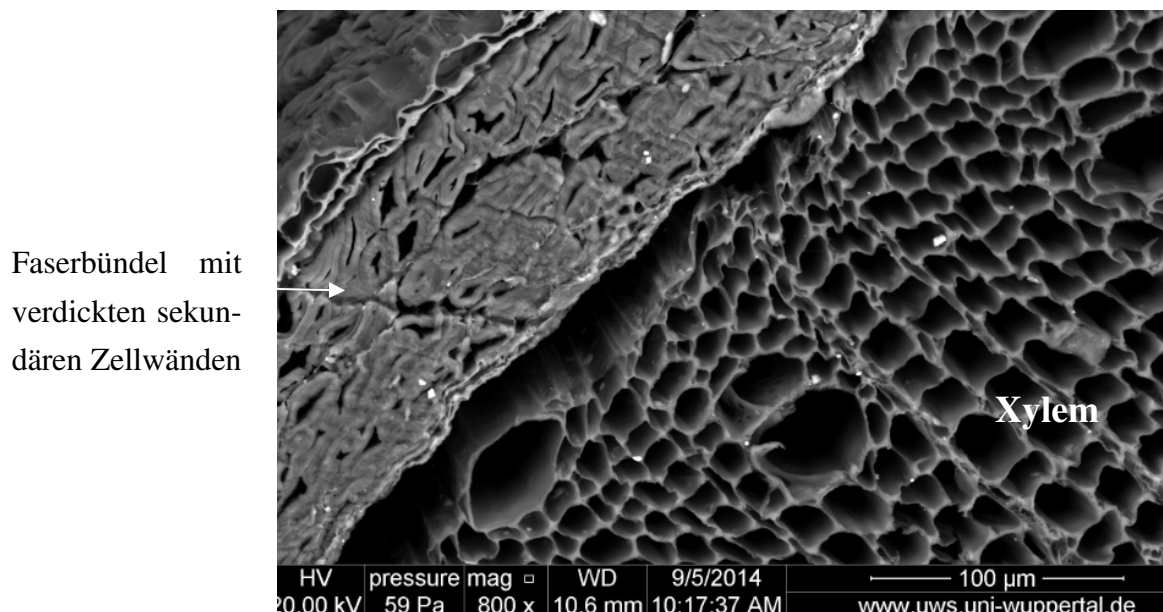
Abbildung 10-4: Box-Whisker-Plot des Zugmoduls, Einfrierversuch

Über alle Parameter hinweg zeigt sich im Trend der größte Einfluss des Frostes bei der Probe mit einer Woche Frost-Tau-Zyklen. Über einen längeren Zeitraum verändern sich die Parameter nicht weiter. Wahrscheinlich werden die Pflanzenzellen durch mehrmaliges Einfrieren und Auftauen geschädigt und die Verbindungen zwischen den Zellwänden gelockert. Dadurch kann es möglicherweise zu einem Versatz von Einzelfasern innerhalb der Faserbündel kommen, welches die Zugfestigkeit beeinflusst.

## 11 Mikroskopische Aufnahmen

Die Faserqualität wird maßgeblich von der Reife der Faserzellen sowie dem Röstgrad bestimmt. Wichtige Aufschlüsse darüber geben bildgebende Methoden. Es wurden verschiedene Mikroskopie-Techniken getestet, die sich jedoch als zu kosten- und vor allem zu zeitintensiv herausstellten und im Rahmen dieser Arbeit nicht leistbar waren. Trotzdem sollen die erstellten Testaufnahmen dieser Arbeit nicht vorenthalten werden.

Eine Möglichkeit der Bildgebung bietet die *Environmental Scanning Electron Microscopy (ESEM)*, die eine Variante der Rasterelektronenmikroskopie darstellt. In Abbildung 11-1 ist eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Hanfstängels dargestellt, dessen Faserzellen ein spätes Reifestadium aufweisen. Die sekundären Zellwände füllen durch Lignin-Einlagerungen fast den kompletten Zellinnenraum (Lumen) aus. Noch liegen die Faserzellen als geschlossener Ring um das Xylem-Gewebe herum. Die Stängelprobe stammt aus dem Sommeranbau 2014 zum Zeitpunkt der Blüte.



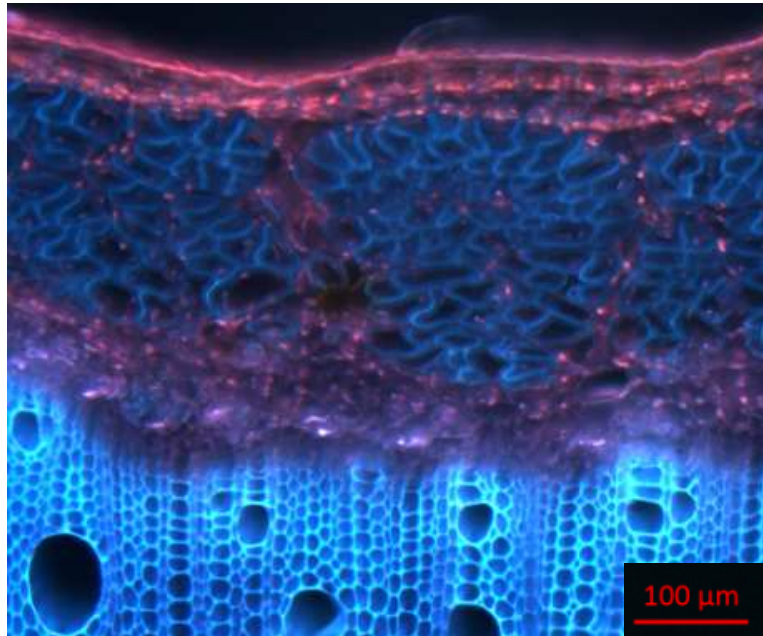
**Abbildung 11-1: Aufnahme mittels ESEM durch einen Hanfstängel**

Für das ESEM bestehen lange Wartezeiten für freie Nutzungskapazitäten, wobei die Beprobung der Feldversuche die Terminabsprache noch erschwerte. Aus diesem Grund wurde die Methode der Fluoreszenz-Lichtmikroskopie als Alternative versucht.

Abbildung 11-2 zeigt eine Fluoreszenz-Aufnahme eines mit Rhodamin-6G eingefärbten Hanfstängels. Die Stängelprobe stammt wie die Probe aus Abbildung 11-1 aus dem Sommeranbau 2014, weist jedoch einen geringeren Reifegrad der Faserzellen auf. Die sekundären Zellwände sind erst schwach ausgebildet, der Hohlraum der Zellen, das Lumen, zeigt noch eine große Öffnung. Rötlich verfärbt haben sich die Zellen des Phloems, die viel Pektin enthalten. Geringe Pektingehalte befinden sich auch in den Mittellamellen, die die einzelnen Faserzellen voneinander trennen. Die Faserzellen liegen zwischen Epidermis und Xylem und

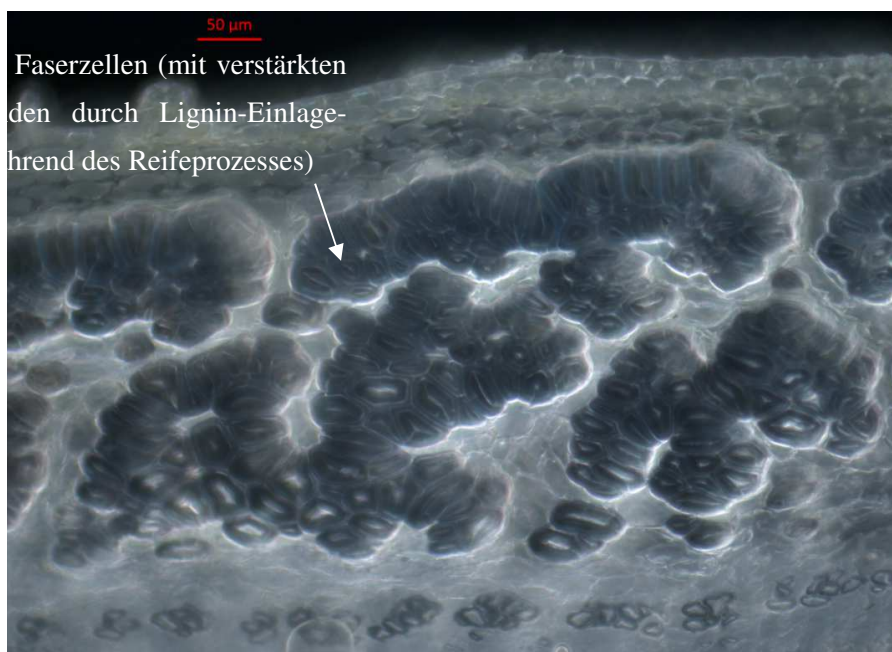
sind zu Bündeln von bis zu 40 Einzelzellen organisiert. Die Bündel werden durch Phloemzellen voneinander getrennt.

Auch die Mittellamellen zwischen den Faserzellen enthalten etwas Pektin. In die Zellwände der Fasern wird dagegen kein Pektin eingelagert.



**Abbildung 11-2: Fluoreszenz-Lichtmikroskopie, Querschnitt durch einen ungerösteten Hanfstängel**

Abbildung 11-3 zeigt eine Dunkelfeld-Mikroskopie Aufnahme gereifter Faserzellen. Die Faserzellen heben sich dunkel von den hellen Phloemzellen ab. Der Reifezustand der Faserzellen ist weiter fortgeschritten als in den beiden Aufnahmen zuvor. Deutlich sind die durch Lignin-Einlagerungen verdickten sekundären Zellwände der einzelnen Faserzellen zu erkennen.

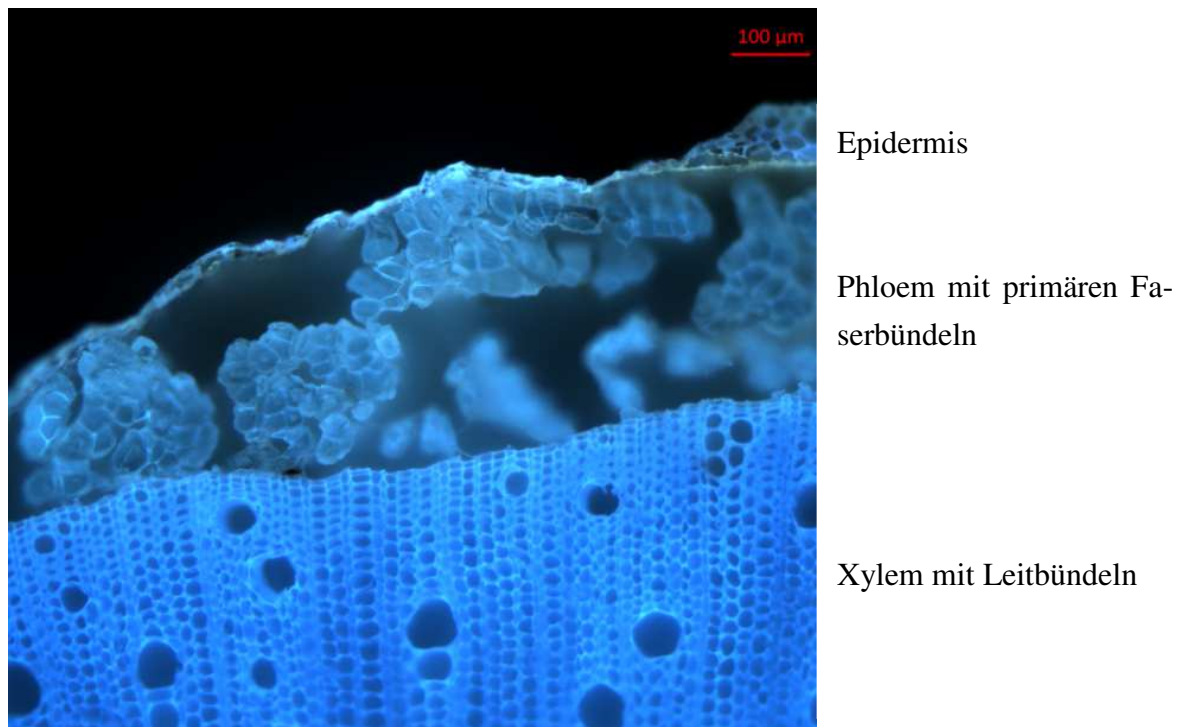


**Abbildung 11-3: Dunkelfeld-Mikroskopie von Faserzellen**



Die Reifung der Zellen erfolgt vom Stängeläußeren zum -inneren. Während das Lumen der Zellen am äußeren Stängelrand bereits fast geschlossen ist, weisen die Zellen zum Xylem hin noch größere Lumen auf. Im unteren Bildrand haben sich sekundäre Faserzellen ausgebildet, die erst im späteren Wachstumsverlauf entstehen und den Stängel nur etwa bis zur Mitte durchziehen.

In Abbildung 11-4 ist eine nicht angefärbte Probe des Einfrierversuchs mit vier Wochen Frost-Tau-Zyklen dargestellt. Hier hat eine deutliche Röste stattgefunden, da die Faserbündel vom Holzteil (Xylem) abgelöst sind. Die Zellen des Phloems, in welches die einzelnen Faserbündel eingebettet waren, sind bereits abgebaut.



**Abbildung 11-4: Fluoreszenz-Lichtmikroskopie, Querschnitt durch einen gerösteten Hanfstängel**

Das Schneiden der Hanfstängel bereitete große Schwierigkeiten, weil sich der Faser- vom Holzteil beim Schneiden verschob bzw. abtrennte, wodurch kein zusammenhängendes Präparat zu erhalten war. Dieses ist jedoch wichtig, um aussagekräftige Bilder über den Röstgrad und einen möglichen Frosteinfluss zu bekommen. Aus diesem Grund hätten die Proben in Paraffin eingebettet und gegebenenfalls zuvor angefärbt werden müssen. Aus den ausgehärteten Proben können anschließend Mikrotomschnitte gefertigt werden.

Dieses war im zeitlichen und finanziellen Rahmen dieser Arbeit nicht leistbar. Jedoch bietet dieses Verfahren eine gute Möglichkeit, die Veränderungen im Stängel durch die Röste bzw. durch die Einwirkung von Frost genauer zu untersuchen und sollte für weitere Forschungen in Betracht gezogen werden.



## 12 Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Winter- und Sommeranbaus, des Lysimeterexperiments und des Einfrierversuches im Fokus auf die eingangs beschriebenen Arbeitshypothesen diskutiert und mit Literaturangaben verglichen.

### 12.1 Hypothese I: Standort

#### 12.1.1 Klima

Evaporation und Transpiration nehmen neben der Niederschlagsmenge eine wichtige Größe in der Betrachtung landwirtschaftlicher Ökosysteme bezüglich ihrer Wasserverfügbarkeit ein (Thornthwaite 1948, Baltas 2007). Dabei spielen Durchschnittstemperaturen, Wärme- sowie Niederschlagssummen eine wichtige Rolle. Heyland (1991) hat die gebräuchliche Darstellung von Klimadiagrammen von Walter und Lieth (1967) auf das Verhältnis von 4:1 modifiziert, um eine schnelle Aussage über die Wasserverfügbarkeit in landwirtschaftlich genutzten Systemen zu erhalten. Dieses Verhältnis erklärt sich durch die Einbeziehung der Verdunstung, die bei einer Temperatur von 10°C 40 mm beträgt (Bandoc 2012). Die Darstellung nach Heyland (1991) wurde auch auf die im Rahmen dieser Arbeit ausgewerteten Wetterdaten angewendet. Im Winteranbau 2013/14 stand den Pflanzen am Standort Lärz signifikant mehr Niederschlag (228 mm) zur Verfügung als an den beiden Standorten in Vermold (120 mm). Nach Heyland (1991) hatten die Pflanzen am Standort Lärz ab August eine ausreichende Wasserversorgung. Am Standort Vermold ergab sich nach der Darstellung von Heyland (1991) bis in den September hinein ein Wasserstress, den die Pflanzen möglicherweise durch die Grundwasseranbindung an diesem Standort ausgleichen konnten. Die volumetrischen Wassergehalte lagen auf allen Standorten zu den Beprobungen im Bereich der nutzbaren Feldkapazität. Zwischen den Wachstumsverläufen der Pflanzen an den verschiedenen Standorten konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

Hanf benötigt vor allem in der Hauptwachstumsphase eine ausreichende Wasserversorgung (Bócsa *et al.* 2000, Krüger 2000, Graf *et al.* 2005a). Für den Sommeranbau gibt Ehrensing (1998) eine Wassermenge zwischen 500 und 700 mm an, von denen nach Bócsa *et al.* (2000) 200-300 mm in der Hauptwachstumsphase verfügbar sein müssen. Im Sommeranbau 2014 lag die Niederschlagsmenge von 410 mm an beiden Standorten unter dieser Empfehlung. Während für die Hauptwachstumsphase am Standort Lärz ausreichend Niederschläge (243 mm) verzeichnet werden konnten, blieben diese am Standort Vermold (172 mm) unter den von Bócsa *et al.* (2000) angegebenen Wassermengen. Die Wassergehalte des Oberbodens befanden sich an beiden Standorten zu beiden Beprobungen (Aussaat und Ernte) innerhalb der nutzbaren Feldkapazität für sandige Böden (Gernandt 2007, Ahl *et al.* 2016). Jedoch spiegeln diese beiden Beprobungen nur eine Momentaufnahme der Wassergehalte wider und geben keinen Aufschluss über die Wasserverfügbarkeit während des Hanfwachstums. Abot *et al.* (2013) beschreiben eine Verringerung des Längenwachstums durch Wasserstress von

bis zu 56 %. Am Standort Lärz wurden signifikant höhere Pflanzen ausgebildet. Dieses liegt zum einen an der höheren Niederschlagsmenge an diesem Standort, kann möglicherweise auch durch den Anbau der Sorte Futura an diesem Standort gegenüber der Sorte Fedora am Standort Versmold begründet sein kann. Scheer-Triebel und Léon (2000) beschreiben sortenbedingte Ertragsunterschiede von bis zu 50 %.

Als Wärmesummen geben Prjanischnikow (1930) und Bócsa *et al.* (2000) zwischen 1800°C und 2000°C an. Bei frühreifen Sorten reduziert sich die Wärmesumme um ca. 300°C (Roller 2009). Im Winteranbau 2013/14 wurde eine Wärmesumme von ca. 1100°C für beide Standorte erfasst. Im Sommeranbau 2014 summierten sich die Tagesmitteltemperaturen auf Werte von ca. 2100°C und entsprechen den in der Literatur angegebenen Werten. Die im Winteranbau ermittelten Wassermengen und Wärmesummen liegen deutlich unter denen des Sommeranbaus, wobei die verkürzte Wachstumszeit berücksichtigt werden muss. Im Sommeranbau werden 100-120 Tage bis zur technischen Reife angegeben (Bócsa *et al.* 2000, Karus *et al.* 2008, Schäfer 2003), im Winteranbau stehen den Pflanzen nur zwischen 45 und 60 Tage zur Verfügung. In der verkürzten Wachstumszeit werden geringere Pflanzenhöhen und Erntemengen ausgebildet, wodurch sich der Wärme- und Wasserbedarf reduziert.

Neben Temperatur und Niederschlag ist die Tageslänge für den Ertrag im Hanfanbau von Bedeutung, da durch sie das Einsetzen der Blüte bestimmt und das Längenwachstum beendet wird. (Meijer *et al.* 1995, Struik *et al.* 2000, Cosentino *et al.* 2012). Graf *et al.* (2005a) beobachteten den Blühbeginn sortenabhängig zwischen Ende Juni und Anfang August. Der Beginn der Samenreife fiel auf Mitte bis Ende August. Im Winteranbau unterscheiden sich die Versuchsstandorte nicht signifikant bezüglich der Tageslänge. Der Blühbeginn wurde von den Landwirten nicht dokumentiert. Zur Beprobung Mitte/Ende September waren bereits erste Samen ausgebildet. Somit können keine Aussagen über den Zeitpunkt des Blühbeginns und Einsetzens der Samenreife getroffen werden. Ebenso konnten keine Unterschiede in den Wachstumsverläufen der Pflanzen des Sommer- und Winteranbaus aufgrund zu großer Boniturabstände aufgezeigt werden. Anhand der interpolierten Wachstumsverläufe dauerte die Jugendentwicklung im Winteranbau ca. 4 Wochen, welches von Bócsa *et al.* (2000), Zöphel *et al.* (2001) und Mielke & Schöber-Butin (2002) auch für den Sommeranbau angegeben wird. Möglicherweise gehen die Hanfpflanzen bei der Aussaat im Juli aufgrund höherer Boden- und Lufttemperaturen und ausreichender Wasserversorgung bereits schneller in die Phase des schnellen Wachstums über als im Sommeranbau. Dies könnte sich möglicherweise auf die Ausbildung und Qualität der Faserzellen auswirken.

### 12.1.2 Boden

Hanf stellt keine besonderen Ansprüche an die Bodenverhältnisse und ist auch für den Anbau auf Grenzertragsböden (Geisler 1988, El-Ghany 2002), zur Niedermoor- und Ödlander-schließung, als auch für den Grünlandumbruch geeignet (Hoffmann 1957).

Für eine ertragsreiche Ernte und gute Faserqualität benötigt Hanf jedoch einen nährstoffrei-chen Standort (Jahn-Deesbach 1965, Bassetti *et al.* 1998, Bócsa *et al.* 2000, Léon *et al.* 2004) oder eine zusätzliche Nährstoffversorgung in Form einer Düngung (Haverkamp 2014). Im Winteranbau 2013/14 wurde der Hanf auf zwei sandigen Standorten (Lärz und Versmold 2) sowie einem lehmigen Boden (Versmold 1) angebaut. Die Trockenrohdichte des lehmigen Standortes ist mit  $1,6 \text{ g/cm}^3$  im Pflughorizont deutlich höher als an den beiden sandigen Standorten ( $1,3 \text{ g/cm}^3$ ). Der Landwirt berichtete, dass er den lehmigen Boden zur Aussaat durch Walzen rückverdichtete, da der Boden aufgrund des höheren Schluff- und Tonanteils beim Pflügen Schollen geworfen hatte. Aufgrund der Bodenart wurden am lehmigen Stand-ort Versmold 1 im Oberboden, trotz gleicher Niederschlagsmengen, stets höhere Wasser-gehalte als am sandigen Standort Versmold 2 bestimmt.

Die Hektarerträge der sandigen Böden liegen im Trend höher als auf dem lehmigen Standort. Aufgrund der Verdichtungsgefahr sind lehmige und tonige Böden weniger gut für den Han-fanbau geeignet. Versuche in Sachsen-Anhalt (Debruck & Reichardt 2002) sowie in der Oberlausitz (Röhricht & Schulz 2003) zeigten ebenfalls, dass der Hanfanbau bei ausreichen-der Wasserversorgung und entsprechender Düngung auf leichten Böden möglich ist.

Die pH-Werte befinden sich auf allen Standorten zwischen 5,6 und 7,2 wobei der lehmige Standort Versmold 1 höhere pH-Werte aufweist als die beiden sandigen Standorte Lärz und Versmold 2. Dies ist durch das größere Pufferungsvermögen von lehmigen Böden aufgrund des höheren Tonmineralgehaltes begründet (Kuntze *et al.* 1994). Alle Standorte liegen in dem für den Hanfanbau empfohlenen Bereich zwischen 5,5 und 7,5 (Bócsa *et al.* 1997, Ha-verkamp 2014).

Neben den Bodeneigenschaften ist die Saatbettbereitung für den Hanfanbau von wichtiger Bedeutung. Sie wirkt sich direkt auf die Anzahl der auflaufenden Pflanzen aus, die zusätzlich von der Keimfähigkeit des Saatguts und den Witterungsbedingungen zur Aussaat beeinflusst werden. Die Auflaufraten im Winteranbau betragen am Standort Lärz in beiden Aussaatstär-ken ca. 70 % der ausgebrachten Samenkörner pro Quadratmeter. Am Standort Versmold 1 liefen in der niedrigen Aussaatstärke 61,5 % und in der hohen Aussaatstärke 73,1 % auf. Am Standort Versmold 2 konnten dagegen Auflaufraten von über 100 % ermittelt werden, ob-wohl die gleiche Drilltechnik und Einstellung verwendet wurde, sowie dieselben klimati-schen Bedingungen wie am Standort Versmold 1 vorherrschten. Dieses ist möglicherweise über Schwankungen im Tausendkorngewicht (TKG) des Saatguts zu erklären. Die Aussaat-menge berechnet sich über das Tausendkorngewicht in Gramm multipliziert mit der Saat-stärke (Körner pro Quadratmeter), geteilt durch die Keimfähigkeit (in Prozent) (Graf *et*

al. 2005a). Daraus ergibt sich für Saatgutpartien mit einem Tausendkorngewicht von ca. 15 g und 130 Kö/m<sup>2</sup> mit einer durchschnittlichen Keimfähigkeit von 90 %, eine Aussaatmenge von 25 kg/ha. In der vorliegenden Arbeit wurden die Parameter Tausendkorngewicht und Keimfähigkeit nicht bestimmt und die Angaben des Saatgutherstellers übernommen. Die Einstellung der Drillmaschine wird mittels einer Abdreprobe und dem Wiegen der abgedrehten Saatgutmenge vorgenommen. Diese Methode birgt Fehler, da die Fließeigenschaften und die Tausendkorngewichte infolge von Änderungen in der Luftfeuchte und Kornform variieren können (Marquering & Scheufler 2006). Durch die Bodenbearbeitung am lehmigen Standort Vermold 1 entstand ein feineres und gleichmäßigeres Saatbett, welches für einen guten Bodenkontakt der Samenkörner notwendig ist, um die Wasseraufnahme zur Keimung zu gewährleisten. Gleichzeitig erhöht sich durch diese Maßnahme die Trockenrohdichte des Bodens, welches zu einer geringeren Zahl an aufgelaufenen Hanfpflanzen gegenüber der sandigen Versuchsfläche an diesem Standort führte. Selbiges wurde auch von Vogl (1997) und Schulz (1999) beobachtet. In einem Feldversuch in Österreich, bei dem Faserhanf als Zweitfrucht nach Frühkartoffeln angebaut wurde, kam es aufgrund der Bodenverdichtung durch den Kartoffelroder zu einer starken Wachstumsdepression und einem kompletten Ernteausfall (Meister *et al.* 1999). Auch Kannenberg (1943) beschreibt eine Verringerung des Ertrages aufgrund von Bodenverdichtungen. Im Vergleich zu Hanf weisen andere Kulturpflanzen wie z. B. Weizen und Gerste (TKG: 40-55 g) und Mais (TKG: 200-450 g) höhere Tausendkorngewichte auf (o.V. o.J.). Dadurch ist in dem einzelnen Saatkorn mehr Energie eingelagert, wodurch diese Kulturen auch bei verdichteten Boden einen hohen Feldaufgang erzielen.

Die organische Substanz stellt aufgrund ihrer großen Oberfläche einen wichtigen Sorbenten für Wasser und Nährstoffe dar und trägt zur Bodenfruchtbarkeit bei, die die Grundlage für hohe Erträge ist (Blume *et al.* 2010).

Nach Körschens *et al.* (1997) korreliert der C<sub>org</sub>-Gehalt stark mit dem Tongehalt, so dass sandige Böden geringere Gehalte aufweisen als tonige Böden. Durch die Verwendung von Stallmistdüngern steigen die C<sub>org</sub>- und N<sub>t</sub>-Gehalte des Bodens (Krzysch *et al.* 1992, Körschens *et al.* 1998, Sümer 2012). Je nach Bodenart und aufgebrauchten Düngemittel gibt Körschens (2006) aus Langzeitversuchen aus ganz Europa C<sub>org</sub>-Gehalte zwischen 0,5 und 3 % an. Die C<sub>org</sub>-Gehalte des Oberbodens in dieser Arbeit betragen 1,3 % auf den beiden sandigen Versuchsstandorten, während der C<sub>org</sub>-Gehalt des lehmigen Standortes Vermold 1 mit 1,5 %, bedingt durch den höheren Tongehalts, einen höheren Gehalt aufweist.

Die wasserlöslichen organischen Bestandteile stellen den reaktivsten Pool der bodenbürtigen organischen Substanz dar (Bu *et al.* 2011). Die Löslichkeit der verschiedenen organischen Verbindungen ist abhängig von der Temperatur der Lösung (Kätterer *et al.* 1998). Der heißwasserextrahierbare Kohlenstoff und Stickstoff beinhaltet mehr stabile Bestandteile, die den Nährstoff- und Energievorrat für Pflanzen und Mikroorganismen bereithalten (Hamkalo & Bedernichek 2014). Der heißwasserlösliche Anteil ist ein sehr heterogenen Pool, da durch

das heiße Wasser die Zellen der Mikroorganismen abgetötet und deren Inhaltsstoffe in die Lösung extrahiert werden. Während Schulz (2002) den heißwasserlöslichen Kohlenstoff als relativ unabhängig vom Probennahmezeitpunkt beschreibt, weisen die  $C_{HWE}$ -Gehalte im Winteranbau 2013/14 nach dem Ende des Pflanzenwachstums eine deutliche Abnahme auf. Bei der nächsten Beprobung, die nach dem ersten Frost durchgeführt wurde, steigen die  $C_{HWE}$ -Konzentrationen wieder an, ausgenommen am Standort Lärz in der hohen Aussaatstärke, auf dem die Werte weiter abnehmen. Die Gehalte an  $N_{HWE}$  zeigen denselben Trend. Leinweber *et al.* (1995) beobachteten ähnliche Schwankungen der  $C_{HWE}$ - und  $N_{HWE}$ -Konzentrationen über den Jahresverlauf und erklären die Abnahme der Gehalte durch das Abreifen und Absterben der Feldfrucht. Der Eintrag von Wurzelexudaten, der eine signifikante Quelle für die gelöste organische Substanz darstellt (Yano *et al.* 2000), fehlt nach dem Absterben des Wurzelsystems. Im Winteranbau von Hanf wird dem Boden im Herbst durch das Abfallen der abgestorbenen Hanfblätter leicht abbaubare organische Substanz zugeführt, die schnell umgesetzt wurde. Bereits Mitte Januar konnten auf der Bodenoberfläche der Versuchsstandorte keine Blattreste mehr vorgefunden werden. Dieses könnte eine mögliche Erklärung für das Ansteigen der  $C_{HWE}$ -Gehalte zur Beprobung nach dem Frost sein. Auch Leinweber *et al.* (1995) stellten einen langsamen Anstieg der  $C_{HWE}$ -Konzentrationen im Herbst fest. Leinweber *et al.* (1994) beschreiben einen generellen Trend der Konzentrationen der heißwasserlöslichen organischen Substanz mit einem Maximum im Frühjahr, einem Minimum im Sommer und einem weiteren, jedoch geringeren Maximum im Herbst. Allerdings stellten die Autoren auch Abweichungen von diesem Verlauf fest, bei dem die Konzentrationen plötzlich abnahmen. Diese Abnahmen korrelierten mit einem erhöhten Wassergehalt im Boden, so dass von einer vertikalen Verlagerung mit dem Sickerwasser ausgegangen werden kann (Leinweber *et al.* 1994). Die im Winteranbau 2013/14 ermittelten  $C_{HWE}$ -Konzentrationen (37-80 mg C/100 g Boden), sowie die des Sommeranbaus 2014 (75-87 mg C/100 g Boden), liegen deutlich über denen von Körschens und Schulz (1999) angegebenen Konzentrationen für landwirtschaftlich genutzte Böden von bis zu 53 mg C/100 g Boden. In der von ihnen erstellten Klassifizierung gilt ein  $C_{HWE}$ -Gehalt von über 40 mg/100 g Boden als sehr hoch. Die Unterschiede zu den in dieser Arbeit ermittelten Konzentrationen können zum einen in den unterschiedlichen Messmethoden zur Bestimmung des  $C_{HWE}$ -Gehaltes begründet sein. Zum anderen räumen Wessolek *et al.* (2008) ein, dass die von Körschens und Schulz (1999) genannten Richtwerte, welche für grundwasserferne Böden erhoben wurden, weiter nach Standorten differenziert werden müssen.

In den Jahren von 1970 bis Ende der 1990er Jahre hat sich der Gehalt an organischer Substanz und der in ihr gebundenen Nährstoffe durch verstärkte Düngeapplikationen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen stark erhöht. Sandige Böden von Veredelungsbetrieben zeigen eine Anreicherung bis zu 26 t C/ha und 2,4 t N/ha (Nieder 1999). Nach Zsolnay und Görlitz (1994) brachte eine organische Düngung mit einer jährlichen Rate von 150 kg N/ha ca. 3 t/ha organischen Kohlenstoff hervor, der den Gehalt an wasserlöslichem Kohlenstoff

bis zu 74 % ansteigen lassen kann. Šeremešić *et al.* (2013) ermittelten eine hohe Korrelation der  $C_{HWE}$ -Gehalte mit dem  $C_{org}$ -Gehalt des Bodens, die auch im Winteranbau nachgewiesen werden konnte ( $R^2 = 0,91$ ). Während die Autoren einen Anteil des  $C_{HWE}$  am  $C_{org}$  zwischen 1,1 und 1,75 % ermittelten, geben Ghani *et al.* (2003) Anteile zwischen 3 und 6 % an, die sich mit den Angaben von Leinweber *et al.* (1995) (3-5 %) decken. In dieser Arbeit konnte mit Werten zwischen 4,9 und 8,2 % ein höherer Anteil des  $C_{HWE}$  am  $C_{org}$  aufgrund höherer  $C_{HWE}$ -Gehalte bestimmt werden.

Der Einfluss der Stickstoffdüngung auf die Höhe des heißwasserextrahierbaren Kohlenstoffgehaltes wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Während Zsolney und Görlitz (1994) und Thomas *et al.* (2016) keinen signifikanten Effekt der Stickstoffdüngung auf die Höhe des  $C_{HWE}$ -Gehaltes angeben, beschreiben Mazzarino *et al.* (1993) und Liang *et al.* (1998) einen abnehmenden Gehalt. Nach Leinweber *et al.* (1995), Chantigny *et al.* (1999) und McTiernan *et al.* (2001) weisen organisch gedüngte Felder einen höheren  $C_{HWE}$ -Gehalt auf. Zudem wird die Umsetzung des  $C_{org}$  durch die Bodenbearbeitung (z.B. Pflügen) signifikant beeinflusst (Hofmann 2013). Chantigny *et al.* (2003) stellten starke Schwankungen im leicht verfügbaren Kohlenstoff fest, die durch die Stickstoffdüngung hervorgerufen werden können. Möglicherweise lassen sich darüber die jahreszeitlichen Schwankungen erklären, die die  $C_{HWE}$ -Gehalte im Winteranbau 2013/14 aufweisen.

Die  $N_{HWE}$ -Konzentrationen des Winteranbaus 2013/14, sowie des Sommeranbaus 2014 befinden sich zwischen 4 und 11 mg N/100 g Boden und liegen im Rahmen der in der Literatur beschriebenen Werte (Leinweber *et al.* 1995, Sümer 2012). Im Trend zeigen sie einen ähnlichen saisonalen Verlauf wie die  $C_{HWE}$ -Gehalte. Die während des Versuchsverlaufs erhobenen  $N_t$ -Gehalte des Oberbodens nehmen Werte zwischen 0,11 und 0,14 % ein. Damit decken sie sich mit den Literaturangaben für landwirtschaftlich genutzte Böden (Körshens *et al.* 1998, Masunga *et al.* 2016, Guo *et al.* 2017, Sainju *et al.* 2017). Der Anteil des  $N_{HWE}$  am  $N_t$  im Anbauversuch liegt zwischen 4,0 und 10,7%. Leinweber *et al.* (1995) geben für landwirtschaftlich genutzte Flächen Anteile von 4-6 % an, Curtin *et al.* (2006) zwischen 2,6 und 8,7 %, wohingegen Sümer (2012) Anteile bis 10 % ermittelte. Dies spiegelt die hohe Variabilität der Werte wider.

Ghani *et al.* (2003) stellten signifikant höhere  $C_{HWE}$ -Gehalte auf P-gedüngten Standorten fest. Neben Stickstoff wird dem Boden durch die organische Düngung und durch Pflanzenreste auch Phosphor zugeführt, der durch die Mineralisation aus der organischen Substanz freigesetzt wird. Möglicherweise sind die im Versuchsverlauf dieser Arbeit gemessenen höheren  $C_{HWE}$ -Gehalte durch die Verwendung von Wirtschaftsdüngern begründet, deren P-Gehalte vor allem in Gülle und Geflügeldüngern hoch sind (Landwirtschaftskammer NRW 2015).

## 12.1.3 Nährstoffe

### 12.1.3.1 Düngung

Neben den im Boden enthaltenen Gesamt-Nährstoffgehalten, spielen die durch Düngung zugeführten Nährstoffe für das Pflanzenwachstum eine entscheidende Rolle. Während für das Hanfwachstum der Einfluss von Stickstoff auf die Höhe der Erntemenge bedeutend ist, ist die ertragssteigernde Wirkung von Phosphor und Kalium gering (Aubin *et al.* 2015, Papastylianou 2018). Finnan und Burke (2013) fanden keine Korrelation zwischen dem Ernteertrag und dem Kaliumgehalt im Boden. Nach Ivonyi *et al.* (1997) werden die Pflanzenhöhe und Biomasse bei Hanf nicht durch die P-Düngung beeinflusst, welches Vera (2010) bestätigt. Aus diesem Grund liegt der Fokus der in der Literatur beschriebenen Düngeversuche auf der Stickstoffdüngung (Mediavilla *et al.* 1998a, Graf *et al.* 2005b, Léon *et al.* 2004, Haverkamp 2014). Die positive Wirkung von Stickstoff auf die Erntemenge bei Faserhanf zeigt sich jedoch nur bei ausreichender Wasserversorgung (Rowell 1994). Erhöhte Stickstoffgaben von über 150 kg N/ha, setzten Hanfpflanzen nur bei zeitgleich niedrigen Stickstoffgehalten im Boden um (Vera 2004). Die zulässige Stickstoffgabe zur Aussaat des Hanfes im Winteranbau wird durch die neue Düngeverordnung (DüV) für den Zwischenfruchtanbau auf 60 kg Gesamt-N/ha oder 30 kg NH<sub>4</sub>-N beschränkt (BLE 2017). Allerdings würde dem Hanf, wenn die Möglichkeit der Zuordnung als Zweitfrucht bestände, nur eine vergleichbare Düngemenge wie im Winterzwischenfruchtanbau verbleiben, da die Obergrenze von 170 kg Gesamtstickstoff pro Hektar und Jahr nicht überschritten werden darf (BMEL 2017). Zur Veranschaulichung dient eine Beispielrechnung mit Wintergerste, die aufgrund des frühen Erntetermins gut als Vorfrucht für den Hanf im Winteranbau geeignet ist. Als Sollwert wird eine Düngegabe zur Wintergerste von 180 kg N/ha veranschlagt. Bei einem mittleren Nmin-Gehalt von ca. 20 kg N/ha verbleiben für die Hanfdüngung 160 kg N/ha. Unter Abzug der Startgabe im Herbst (50-70 kg N/ha), ist im Folgejahr für die 2. und 3. Düngegabe für die Wintergerste eine Stickstoffsumme von 90-110 kg N/ha möglich (LWK NRW 2015). Da die Obergrenze bei 170 kg N/ha liegt, verbleiben für die Düngung des Hanfes (wenn die Möglichkeit des Anbaus als Zweitfrucht bestände) zwischen 60 und 80 kg N/ha. Diese Düngemenge befindet sich im gleichen Rahmen wie die Düngemenge als Winterzwischenfrucht.

Gülle ist von den Wirtschaftsdüngern für die Verwendung im Hanfanbau gut geeignet (Bócsa *et al.* 1998, Finnan & Burke (2013)). In Versuchen von Röhrich und Schulz (2000) bildete der Hanf höhere Stängel- und Fasererträge aus als durch vergleichbare Mineraldüngergaben. Bei hohen Güllegaben geht der Hanf später in die Blüte. Erhöhte N-Gaben können zudem eine Verringerung der Bestandesdichte, bzw. eine Verstärkung des Selbstaussäungseffektes sowie größere Wuchshöhen und Stängeldurchmesser bewirken (Mediavilla *et al.* 1998a, Schluttenhofer & Yuan 2017).

Die Zusammensetzung von Wirtschaftsdüngern schwankt sehr stark und variiert nach Tierart, den Haltungsbedingungen, der Fütterung, sowie den Lagerungsbedingungen (Landwirtschaftskammer NRW 2014). Als Größe für die Ausbringmenge wird der Stickstoffgehalt des Wirtschaftsdüngers herangezogen. Die Gehalte an Phosphor und Kalium werden über Gehaltstabellen (Landwirtschaftskammer NRW 2014). Da Verhältnisse an P und K je nach Düngerart unterschiedlich sind, weichen auch die aufgebrauchten Verhältnisse dieser Nährstoffe auf den Versuchsflächen voneinander ab.

Die Ausnutzung der darin enthaltenen Nährstoffe wird von den Bodenverhältnissen (Textur, Korngrößen, Tongehalt) sowie der Witterung und der Einbringtiefe bedingt (Brod 2012).

In dieser Arbeit können keine Aussagen zu den Gehalten an mineralisierbarem Stickstoff (N<sub>min</sub>) getroffen werden, da nur der Nitrat-Stickstoff und nicht der Ammonium-Stickstoff bestimmt wurde. Die ausgebrachten Wirtschaftsdünger wurden zuvor nicht auf ihre Inhaltsstoffe und Zusammensetzung untersucht, so dass die Nährstoffgehalte anhand von Düngetabellen überschlagen wurden (LWK NRW 2014). Im Winteranbau 2013/14 wurden am Standort Versmold 20 m<sup>3</sup> Rindergülle auf beiden Versuchsflächen aufgetragen, welches einer Düngemenge von ca. 78 kg N/ha, 14 kg P/ha und 76 kg K/ha entspricht. Am Standort Lärz wurde ein Gemisch aus je 20 dt Rinder- und Putenmist appliziert, mit Gehalten von ca. 49 kg N/ha, 18 kg P/ha und 43 kg K/ha. Stallmist ist schwerer abbaubar als Gülle, jedoch hält die Wirkung von Stickstoff im Stallmist länger an und wirkt noch bis ins Folgejahr hinein (Hege *et al.* 2003). Im Sommeranbau 2014 wurden am Standort Versmold ca. 117 kg N/ha, 21 kg P/ha und 114 kg K/ha in Form von 30 m<sup>3</sup> Rindergülle aufgebracht. Am Standort Lärz wurde mit 40 dt Hühnertrockenkot (HTK)/ha gedüngt (102 kg N/ha, 35 kg P/ha, 58 kg K/ha). Die Umwandlungsprozesse des HTK sind stark witterungsabhängig und daher nur bedingt beeinflussbar. Zudem ist mit einer verzögerten Startwirkung zum Wachstumsbeginn der Pflanzen aufgrund der verspäteten Stickstofffreisetzung zu rechnen (Yara 2008). Nach Shepherd *et al.* (1993) wird die Stickstoffbilanzierung bei der Verwendung von organischen Düngern erschwert, da der aufgebrauchte Gesamtstickstoffgehalt (z.B. durch Verluste von Ammoniakausgasungen bei der Ausbringung) und der Zeitpunkt der Stickstofffreisetzung im Boden schwer bestimmbar sind.

Über die bereits im Boden vorhandenen pflanzenverfügbaren Nährstoffe (aus vorangegangener Düngung oder Ernterückstände der Vorfrucht) auf den landwirtschaftlichen Versuchsflächen können keine Aussagen getroffen werden, da die keine Beprobung vor dem Düngeauftrag zum Hanf durchgeführt wurde. Als Ausgangswert für die Nährstoffversorgung im Hanfanbau wurde daher die Beprobung zur Aussaat gesetzt.

### **12.1.3.2 Nitrat-Stickstoff**

Im Winteranbau 2013/14 wurden zur Aussaat am Standort Lärz mit 61 kg NO<sub>3</sub>-N/ha im Oberboden die niedrigsten Nitrat-Stickstoffgehalte gemessen. Dieses resultiert aus der ge-



ringeren Düngung mit Stickstoffgehalten von ca. 49 kg/ha. Zudem setzt der verwendete Festmist aufgrund des weiten C/N-Verhältnisses (Rindermist 19:1, Putenmist 14:1) den Stickstoff verzögert frei, der erst nach 7 bis 8 Monaten verfügbar sein kann (Eghball *et al.* 2002, Schönberger 2010). Dieses wäre eine mögliche Erklärung für den NO<sub>3</sub>-N-Anstieg nach Ende des Pflanzenwachstums bis zur Ernte an diesem Standort. An den beiden Standorten Versmold 1 und 2 unterscheiden sich die NO<sub>3</sub>-N-Gehalte im Boden trotz gleicher Düngerart und -menge sehr stark. Am lehmigen Standort Versmold 1 wurden im Oberboden 231 kg NO<sub>3</sub> N/ha bestimmt, am sandigen Standort Versmold 2 dagegen nur 110 kg NO<sub>3</sub>-N/ha.

Der lehmige Boden am Standort Versmold 2 kann aufgrund des höheren Tonmineralgehaltes mehr Nährstoffe speichern als der sandige Standort Versmold 1 (Maci 2001, Ahl *et al.* 2016). Auch im Sommeranbau 2014 wurden am Standort Lärz zur Aussaat geringere NO<sub>3</sub>-N-Gehalte im Oberboden ermittelt als am Standort Versmold, obwohl ähnliche N-Mengen, jedoch durch unterschiedliche Wirtschaftsdünger, appliziert wurden. Aus flüssigen Düngemitteln, wie z.B. Gülle, wird Stickstoff schneller in pflanzenverfügbare Formen umgesetzt, als aus Festdüngern (z.B. HTK) (Schönberger 2010). Die NO<sub>3</sub>-N-Gehalte reduzieren sich auf den Versuchsstandorten bis zum Ende des Pflanzenwachstums durch die Nährstoffaufnahme der Pflanzen. Zugleich konnte im Unterboden eine Zunahme der NO<sub>3</sub>-N-Gehalte verzeichnet werden, so dass eine Verlagerung aus dem Oberboden mit dem Sickerwasser nicht ausgeschlossen werden kann. In Versuchen von Amaducci *et al.* (2015) ergab eine Stickstoffdüngung zwischen 50-100 kg N/ha die besten Resultate in Bezug auf den Hanfstrohertrag. Nach Mastel *et al.* (1998) ist eine Düngung von 60 kg N/ha ausreichend, wobei sich auf sandigen Böden Stickstoffgaben bis zu 160 kg/ha als ertragswirksam erweisen können.

Trotz geringerer Stickstoffdüngung und NO<sub>3</sub>-N-Gehalte im Boden, erreichen die Pflanzen am Standort Lärz im Winteranbau 2013/14 sowie im Sommeranbau 2014 signifikant größere Pflanzenlängen als auf den Standorten in Versmold. Während der Standort Lärz im Sommeranbau 2014 auch einen größeren Ernteertrag hervorbrachte, lieferte im Winteranbau 2013/14 dagegen der sandigen Standort Versmold 2 höhere Erntemengen. Papastylianou *et al.* (2018) konnten aufzeigen, dass eine höhere Stickstoffdüngung nur bei ausreichender Wasserverfügbarkeit seine Wirkung zeigt. Die Niederschlagssummen weisen im Winteranbau 2013/14 signifikante Unterschiede zwischen den Standorten auf. Die höheren Stickstoffgehalte im Boden am Standort Versmold 1 könnten nach Struick *et al.* (2000) von den Pflanzen aufgrund geringerer Niederschläge nicht in ein vermehrtes Längenwachstum umgesetzt worden sein. Im Sommeranbau 2014 bedingen sich die höheren Pflanzenlängen und Erntemengen am Standort Lärz möglicherweise in der unterschiedlichen Sortenwahl. Die Sorte Futura, die am Standort Lärz angebaut wurde, bringt laut Léon *et al.* (2004), Graf *et al.* (2005a) und Haverkamp (2014) höhere Erträge hervor als die Sorte Fedora, die am Standort Versmold ausgesät wurde. Die Erntemengen im Sommeranbau 2014 lagen bei 125 dt/ha für den Standort Lärz und 70 dt/ha für den Standort Versmold und decken sich mit den Literaturangaben von 50-180 dt/ha (Münzer 1999, Mediavilla *et al.* 2001).

Nach Scheer-Triebel und Léon (2000) können Ertragsunterschiede von bis zu 50 % können allein durch die Sorte begründet sein.

Die im Winter- und Sommeranbau ermittelten Erntemengen wurden auf der Grundlage von Quadratmeterernten berechnet. Eine Erfassung der Erträge aus den unterschiedlichen Aussaatstärken des Winteranbaus 2013/14 war nicht möglich, da die Landwirte die Rundballen bei der Ernte nicht nach der Aussaatstärke trennten. Im Sommeranbau erfolgte nur eine Teillieferung an den Aufbereiter, so dass keine Angaben zur Gesamterntemenge getroffen werden konnten. Die Handernten wurden in dreifacher Wiederholung von einem Quadratmeter aus der Feldmitte entnommen, so dass es möglicherweise zu einer Überschätzung der Erntemenge kam. Die hohe Variabilität der Bestände wurde durch die kleine Beprobungsfläche nicht kompensiert und Randeffekte nicht berücksichtigt. Vor allem die berechneten Felderträge am Standort Vermold 2 weisen aufgrund der hohen Variabilität der Pflanzendichte und -höhe große Spannweiten auf.

Hanus (1996) berichtet für den Hanf im Sommeranbau eine Stickstoffrücklieferung mit den Ernterückständen nach der Felldröste von ca. 60 kg N/ha. Davon wurden 34-37 kg/ha über die Blattmasse und 26 kg/ha durch die Wurzelmasse bedingt. Dieser leicht verfügbare Stickstoff steht dann der Folgefrucht zur Verfügung, wodurch der Hanfanbau eine gute Vorfruchtwirkung besitzt (Zöphel *et al.* 2001, Haverkamp 2014). Es besteht jedoch die Gefahr der Verlagerung und Belastung des Grundwassers, da der Stickstoff leicht zu Nitrat abgebaut werden kann, welches sehr mobil ist. Im Winteranbau 2013/14 nahmen die Pflanzen am Standort Lärz zwischen 61 und 72 kg Stickstoff/ha auf, von dem über die abfallende Blattmasse ca. 15 kg und durch die nach der Ernte auf dem Feld verbleibenden Wurzeln ca. 3 kg N/ha zurückgeführt wurden. Am Standort Vermold wurde mehr Stickstoff durch die Pflanzen aufgenommen (100-120 kg N/ha). Davon verblieben ca. 30 kg N/ha mit der Blattmasse und ca. 9 kg N/ha mit der Wurzelmasse auf dem Feld. Damit ist die N-Rückführung über die auf dem Feld verbleibende Pflanzenmasse im Winteranbau geringer als Hanus (1996) für den Sommeranbau angibt. Im Sommeranbau 2014 wurde über die Blattmasse mehr N (44-62 kg/ha) aufgenommen, wohingegen die Wurzeln geringere N-Gehalte (5-9 kg/ha) aufweisen als die von Hanus (1996) ermittelten Gehalte. In der Summe decken sich die Werte mit denen von Hanus (1996). Für das Hanfstroh geben Hakala *et al.* (2009) 2,6 g N/kg TM an, wohingegen Mastel *et al.* (1998) für die Sorte Fedora, die im Winteranbau 2013/14 angebaut wurde, N-Gehalte von 4,1 g/kg TM ermittelten. Im Winteranbau wurden mit 7-10 g/kg TM deutlich mehr Stickstoff im Stängel eingelagert, welches etwa dem Gehalt von Getreidestroh entspricht (Rowell 1994). Im Sommeranbau 2014 betrug der N-Gehalt der Stängel 5,7-6,5 g/kg TM. Im Winteranbau und Sommeranbau dieser Arbeit bildeten die Pflanzen auf den Standorten Vermold, die mehr NO<sub>3</sub>-N im Boden aufwiesen, prozentual mehr Blattmasse aus als auf dem Standort Lärz. Van der Werf *et al.* (1995b) beschreiben ebenfalls die Ausbildung von mehr Blattmasse bei einer höheren Stickstoffdüngung, welches durch die Versuche von Nykter (2006) bestätigt wird.

Die im Winteranbau 2013/14 bestimmten Nitratbilanzen sind für die sandigen Standorte positiv, welches bedeutet, dass trotz der Entzüge über die Pflanzen eine Zunahme der  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte im Boden stattgefunden hat. Dies kann möglicherweise über die langsame  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Freisetzung aus den Wirtschaftsdüngern begründet sein (Schönberger 2010). Neben der Aufnahme des Nitrats durch die Pflanzen findet im Boden zugleich eine Stickstoffmineralisierung statt. Der lehmige Standort Vermold 1, der zur Aussaat die höchsten  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte aufwies, zeigt eine negative Bilanz. Die Reduzierung der  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte ist wahrscheinlich über Verluste mit dem Sickerwasser oder über die Denitrifikation (Wessolek *et al.* 2008, Knoblauch *et al.* 2013) zu erklären und nicht über eine vermehrte Aufnahme der Hanfpflanzen. Diese liefen an diesem Standort durch die Bodenverdichtung schlechter auf, wodurch weniger  $\text{NO}_3\text{-N}$  benötigt wurde. Verluste über die Denitrifikation entstehen unter anaeroben Bedingungen, die in verdichteten Böden aufgrund des geringeren Porenvolumens eher entstehen (Beare *et al.* 2009) und nach Ahl *et al.* (2016) unter günstigen Bedingungen bis 100 kg N/ha ausmachen können. Im Sommeranbau 2014 wurde am Standort Lärz eine positive  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Bilanz bestimmt, während der Standort Vermold eine negative Bilanz aufweist. Begründungen hierfür sind möglicherweise wieder über die Art der verwendeten Wirtschaftsdünger zu klären. HTK, der am Standort Lärz ausgebracht wurde, setzt seine Nährstoffe im Gegensatz zur Gülle, die am Standort Vermold verwendet wurde, sehr viel langsamer frei. Nach Thomas *et al.* (2016) ist die Fraktion des bodenbürtigen organischen N, der während der Vegetationszeit mineralisiert wird, schwer bestimmbar. Möglicherweise sind unterschiedliche Mineralisationsraten der aufgebrachten Wirtschaftsdünger eine Erklärung für die unterschiedlichen Gehalte an Nitrat-Stickstoff auf den einzelnen Versuchsflächen während des Feldversuches.

Van der Werf *et al.* (1995a) beobachteten bei einer Erhöhung der N-Düngung eine Ausbildung von geringeren Pflanzhöhen. Eventuell bewirkten die höheren  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte im Oberboden der beiden Standorte in Vermold im Winteranbau 2013/14, dass die Pflanzen geringere Wuchshöhen als am Standort Lärz erreichten. Nach Léon *et al.* (2004) kann der Landwirt über die Stickstoffdüngung die Wachstumsbedingungen des Hanfes optimieren. Höppner & Menge-Hartmann (1994) geben höhere Zugfestigkeiten bei geringer gedüngten Varianten an, welches sich auch im Winteranbau 2013/14 für den Standort Lärz bestätigt. Hier wurden die höchsten Zugfestigkeiten und die niedrigsten  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte im Boden bestimmt. In Stickstoffdüngerversuchen von Röhricht und Schulz (2000) und Léon und Von Francken-Welz (2003) stiegen die Faserdurchmesser durch höhere N-Gaben an. Auch am Standort Vermold konnten im Winteranbau 2013/14 auf den Böden mit höheren  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalten signifikant größere Faserbreiten vermessen werden.

### 12.1.3.3 Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphors ( $P_{DL}$ ) und Kaliums ( $K_{DL}$ )

In der Natur kommt Phosphor ausschließlich in gebundener Form vor, überwiegend als Phosphat. Der Phosphatgehalt in Böden liegt durchschnittlich bei ca. 0,05 %, die nach ihrer Bindungsform in organisch gebundene Phosphate, Calcium-Phosphate, Eisen- und Aluminiumphosphate, sowie sorbierte Phosphate eingeteilt werden (Ahl *et al.* 2018). In Deutschland wird der Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphor und Kalium des Oberbodens durch die Extraktion der Nährstoffe mit gepufferten Lactat-Lösungen (CAL oder DL) bestimmt (VDLUFA 1997, 1998) und Gehaltsklassen zugeordnet. Der Zusammenhang zwischen dem pflanzenverfügbaren Gehalt an P und K im Boden und dem Effekt einer Düngung auf die Ertragshöhe von Feldfrüchten, wird noch immer diskutiert. Während manche Autoren eine Steigerung des Feldertrages durch eine Düngung mit P und K beschreiben (Peschke 1997, Munk *et al.* 2005, Li *et al.* 2017), zeigen mehrere Studien keinen Einfluss der P- und K-Düngung auf die Höhe des Ertrages (Schachtschabel 1985, Jungk *et al.* 1993, Köster & Nieder 2004, Lang & Dressel 2008). Langjährige Düngeversuchen in Halle (Saale) konnten aufzeigen, dass der Ernteertrag auch nach Jahren ohne Düngung auf dem gleichen Niveau blieb, sogar wenn die nach den Standardverfahren bestimmten pflanzenverfügbaren Gehalte unterhalb der Gehaltsklasse C lagen. Demnach scheint der pflanzenverfügbare Gehalt an P und K im Boden keine vorherrschende Steuergröße für die Nährstoffverfügbarkeit zu sein (Merbach *et al.* 2000). Diese wird von weiteren Faktoren wie z.B. Boden, Pflanze, Klima usw. beeinflusst. In tonreichen Böden ist die Mobilität von K und P geringer, da der effektive Diffusions-Koeffizient bei steigendem Tongehalt abnimmt (Kuchenbuch & Buczko 2011). Die Sorptionskapazität von Kalium wird hauptsächlich durch die Höhe und die Art der Tonminerale bestimmt, während für Phosphor die Sorptionsplätze zusätzlich zu den Tonmineralen auch von Al- und Fe-Oxiden bereitgestellt werden (Jungk & Claasen 1986).

Die Bodenfeuchte beeinflusst die Wirkung und Mobilität von K (Hu & Schmidhalter 2005) und P (Munk 1985). Bei hohen Nährstoffgehalten im Boden besteht die Gefahr des Austrags mit dem Sickerwasser. Des Weiteren kann ein Oberflächenabfluss mit dem Niederschlag eine Eutrophierung von Gewässern bewirken (Ramsbeck-Ullmann 2006).

Nach VDLUFA (2017) liegt in der Doppellactat-Extraktionsmethode eine Überschätzung der P- und K-Gehalte vor. Sie fordert deshalb eine neue Einteilung der Gehaltsklassen nach Bindungsformen. Besonders für P ist das Verhältnis zwischen pflanzenverfügbarem Phosphor im Boden und dem im Labor chemisch extrahierten Phosphor unsicher. In der EU gibt es noch keine einheitliche Strategie für das Phosphormanagement in der Landwirtschaft, wodurch es ebenfalls keine vereinheitlichte Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphors gibt (Delgado & Scalenghe 2008). Neyroun und Lischer (2003) berichten von 16 offiziellen Bestimmungsmethoden innerhalb der Mitgliedsstaaten der EU.

### 12.1.3.4 Phosphor

Im Winteranbau 2013/14, sowie im Sommeranbau 2014 wurden auf den Versuchsflächen in Lärz und Versmold vergleichbare P-Mengen in Form von verschiedenen Wirtschaftsdüngern aufgetragen. Auf den Versuchsflächen des Hanfanbaus wurden  $P_i$ -Gehalte im Oberboden zwischen 56 und 95 mg/100 g Boden ermittelt. Dabei weisen die sandigen Standorte höhere Gehalte auf als der lehmige Standort Versmold 1. Godlinski (2005) beschreibt vergleichbare  $P_i$ -Gehalte für landwirtschaftlich genutzte Sand- und Lehmböden. Im Winteranbau 2013/14 zeigt der  $P_{DL}$  des Oberbodens in der niedrigen Aussaatstärke auf allen drei Versuchsflächen kaum Schwankungen während der Vegetationszeit. Demgegenüber konnte in der hohen Aussaatstärke am Standort Versmold 1 ein zunehmender Trend beobachtet werden, wohingegen die  $P_{DL}$ -Gehalte am Standort Lärz und Versmold 2 von der Aussaat bis zur Ernte sanken. Die Werte am Standort Lärz waren in beiden Aussaatstärken jeweils signifikant niedriger als an den beiden Versmolder Standorten. Auch im Sommeranbau 2014 wurden am Standort Versmold deutlich höhere  $P_{DL}$ -Gehalte im Boden erhoben als am Standort Lärz. Auf beiden Standorten nahmen die  $P_{DL}$ -Gehalte von der Aussaat bis zur Ernte leicht zu.

Die P-Entzüge mit der Pflanzenmasse korrelieren im Winteranbau mit dem Hektarertrag und waren am Standort Versmold 2 aufgrund des höchsten Feldertrages mit ca. 27 kg P/ha am größten. Am Standort Lärz wurden ca. 16 kg P/ha von den Hanfpflanzen aufgenommen. Im Sommeranbau 2014 wurden P-Entzüge von ca. 25 kg P/ha bestimmt. Ivony *et al.* (1997) ermittelten eine P-Aufnahme durch die Pflanzenmasse zwischen 52 und 67 kg/ha, die deutlich über den Werten dieser Arbeit liegt. Die P-Gehalte im Stängel variieren im Winteranbau 2013/14 zwischen 2 und 4 g/kg Trockenmasse (TM) und weisen, wie bereits beim Stickstoff beschrieben, höhere Gehalte auf als im Sommeranbau (1-2 g/kg TM). Die Gehalte des Sommeranbaus decken sich mit denen von Hakala *et al.* (1999) ermittelten Werten von 1,4 g P/kg TM und liegen über den Gehalten von Getreidestroh (0,8 g P/kg TM) (Rowell 1994). Die Gehalte des Winteranbaus stimmen mit den Werten von Mastel *et al.* (1999) überein, die für die Sorte Fedora einen Stängelgehalt von 2,4 g P/kg TM angeben.

Die Änderungen der  $P_{DL}$ -Gehalte des Oberbodens von der Aussaat bis zum Wachstumsmaximum zeigen im Winteranbau 2013/14 eine sehr hohe Variabilität zwischen den einzelnen Standorten sowie in den Messwiederholungen. Nur am Standort Lärz in der hohen Aussaatstärke, ergab sich eine Abnahme des  $P_{DL}$ , die etwa dem Pflanzenentzug entsprach. An den Standorten Lärz (25 kg/ha) und Versmold 1 (50 kg/ha) konnte trotz des Pflanzenentzuges eine Zunahme des  $P_{DL}$ -Gehaltes bestimmt werden. Am Standort Versmold 1 (50 kg/ha) stiegen die  $P_{DL}$ -Gehalte um 180 kg/ha am stärksten an, auf einen  $P_{DL}$ -Gehalt von 842 kg/ha. Messungenauigkeiten oder die Verwechslung einer Probe können nicht vollständig ausgeschlossen werden. Auf den weiteren Standorten nahm der  $P_{DL}$ -Gehalt durch den Nährstoffentzug der Pflanzen ab. Auch Ratzke und Moor (2005) ermittelten im Oberboden eines schwach lehmigen Sandes unter ackerbaulicher Nutzung  $P_{DL}$ -Gehalte von 1440 kg P/ha. Die

Autoren sowie Andersson (2013) beschreiben, dass die Sorptionskapazität von Phosphor im Unterboden eine wichtige Rolle spielt und als P-Quelle für den Oberboden dienen kann. Phosphate sind im Boden an Sesquioxide gebunden und ihre Konzentration wird durch Adsorption/Desorption sowie Auflösung in der Bodenlösung relativ konstant gehalten (Godlinski 2005, Heinitz *et al.* 2013). Pflanzen können P über Wurzelexudate mobilisieren (Granssee & Merbach 2000). Durch die Ausscheidung von Protonen oder Bicarbonate können sie den pH-Wert der Rhizosphäre ändern, um P aus schwerlöslichen Phosphatquellen aufnehmen zu können (Zhang *et al.* 2011), jedoch ist noch nicht klar, welche P-Fractionen und welche Mechanismen zur Mobilisation genutzt werden.

Des Weiteren kann der Anstieg der  $P_{DL}$ -Gehalte am Standort Vermold 1 in der hohen Aussaatstärke bis zur Ernte hin, auch über bodenphysikalische Aspekte, wie Frostsprengung, Quellen und Schrumpfen, erklärt werden. Dadurch werden Bodenaggregate aufgebrochen und der darin fixierte Phosphor wird in die Bodenlösung freigesetzt (Weihrauch 2017). Ebenfalls wurde an diesem Standort die höchste Blattmasse mit 33 % des Gesamtpflanzengewichtes ausgebildet. Diese stirbt während des Winteranbaus im Herbst ab und der darin enthaltene Phosphor wird dem Boden in Form von organischer Substanz rückgeführt. Allerdings können Pflanzen Phosphor nur in anorganischer Form aufnehmen (Leppin 2007), so dass die verzögerte P-Freisetzung durch die Mineralisation der Blattmasse eine mögliche Erklärung für den Anstieg der  $P_{DL}$ -Gehalte an diesem Standort ist.

Wie eingangs beschrieben, gibt es wenig Forschung zur Auswirkung einer P-Düngung auf den Hanfertrag. Anbauversuche von Meister *et al.* (1999) ergaben keinen einheitlichen Trend bezüglich der Düngegaben von P und K und schienen eher Sorten abhängig zu sein.

### **12.1.3.5 Kalium**

Im Winteranbau wurden am Standort Lärz 43 kg K/ha gedüngt, am Standort Vermold 76 kg K/ha. Im Sommeranbau 2014 wurden 58 kg K/ha und 114 kg K/ha appliziert. Die  $K_t$ -Gehalte sind am lehmigen Standort Vermold 1 aufgrund des höheren Anteils von Tonmineralen am höchsten, wohingegen auf den beiden sandigen Standorten Lärz und Vermold 2 deutlich niedrigere Gehalte bestimmt wurden. Kalium entsteht bei der Verwitterung von Glimmer und Feldspäten (Andersson *et al.* 2007) zu Silikaten. Durch sekundäre Bildung gehen aus den Silikaten Tonminerale hervor (Kuntze *et al.* 1994, Gernandt 2007, Blume *et al.* 2010, Ahl *et al.* 2016), an denen Kalium gebunden ist und gegen andere Kationen ausgetauscht werden kann, wodurch die K-Konzentration in der Bodenlösung relativ konstant gehalten wird (Blume *et al.* 2010).

Moir (2013) beschreiben vier Fraktionen, in denen Kalium im Boden vorkommt: mineralisches K (weitestgehend nicht verfügbar), fixiertes K (langsam verfügbar), austauschbares K (verfügbar) und Kalium in der Bodenlösung (verfügbar) (Carey 2011). Nach Sumner (2000) machen diese Fraktionen 90-98 %; 1-10 %, 1-2 % und 0,1-0,2 % des Gesamt-K-Gehaltes des Bodens aus. Die primären, austauschbaren K-Mineralen werden langsam (Stunden bis

mehrere Wochen) in die Bodenlösung abgeben und dadurch zu einer wichtigen Quelle für die Pflanzenernährung mit Kalium (Syers 1998, McLaren & Cameron 2005). Es entsteht ein dynamisches Gleichgewicht zwischen der Boden-K-Fraktion und der Bodenlösung, wobei Austausch und Fixierung gleichzeitig stattfinden.

Die  $K_{DL}$ -Gehalte nehmen im Winteranbau 2013/14 von der Aussaat bis zur Ernte ab, wobei am lehmigen Standort Vermold 1 mit 24 mg K/100 g Boden mehr als doppelt so hohe Gehalte bestimmt wurden wie auf den beiden sandigen Standorten Lärz und Vermold 2.

Im Sommeranbau 2014 konnten bereits nach der Düngung zur Aussaat Gehalte unterhalb der Gehaltsklasse C aufgenommen werden, so dass ein mögliches K-Defizit für das Hanfwachstum herrschte. Die K-Gehalte der verschiedenen Pflanzenorgane zeigen im Gegensatz zu N und P, einen etwa gleich hohen Gehalt in allen Pflanzenteilen, da sich Kalium hauptsächlich im Zellsaft befindet und nicht in die organische Substanz eingebaut wird (Maiwald & Frank 1936, Schmid 1941). Die Stängel weisen Gehalte zwischen 19 und 27 g K/kg TM auf. Im Sommeranbau 2014 wurden, wie zuvor bei N und P, geringere K-Gehalte in den Stängeln (11-12 g/kg TM) festgestellt. Die Blüten und Blätter enthalten höhere K-Gehalte als die der Stängel und Wurzeln, so dass eine gleichmäßige Anreicherung innerhalb der Pflanze hier nicht gegeben war. Hakala *et al.* (1999) bestimmten K-Gehalte in Hanfstängeln von 9,6 g K/TM, die deutlich unterhalb der in diesem Versuch erhobenen Gehalte liegen. Mastel *et al.* (1994) geben für die Sorte Fedora Stängelgehälter von 14,6 g K/kg TM an. Die Stängelgehälter des Sommeranbaus 2014 zeigen dagegen geringere Gehälter als die von Mastel *et al.* (1994) angegebenen Werte. Möglicherweise führte der niedrigere  $K_{DL}$ -Gehälter im Boden zu einer verringerten Aufnahme durch die Pflanzen.

Die  $K_{DL}$ -Entzüge durch die Hanfpflanzen korrelieren im Winteranbau 2013/14 nicht mit der Ertragsmenge. Obwohl am Standort Vermold 1 die niedrigsten Erträge ermittelt wurden, nahmen die Pflanzen mehr Kalium auf als am Standort Lärz. Eventuell ist die Aufnahme durch die Pflanzen höher, wenn die Verfügbarkeit im Boden höher ist. Im Sommeranbau 2014 wurde dagegen mehr Kalium am Standort Lärz aufgrund der höheren Erntemenge entzogen. Betrachtet man den Pflanzenentzug pro Tonne Ertrag nahmen die Pflanzen am Standort Vermold insgesamt mehr Kalium über ihre Masse auf.

Die saisonalen  $K_{DL}$ -Änderungen im Oberboden des Winteranbaus 2013/14 zeigen ein ebenso variables Bild wie die  $P_{DL}$ -Gehälter. Die Wiederholungsmessungen weisen ein hohes Streuungsmaß auf, welches neben der hohen Variabilität innerhalb des Bodens, auch in der niedrigen Wiederholungspräzision der ICP-OES-Messung im Messbereich um 1 mg/l, begründet sein kann. Die relative Standardabweichung zwischen den echten Probenwiederholungen betrug für Phosphor bis zu 17 % und für Kalium 19 %. Die höchste  $K_{DL}$ -Abnahme konnte am Standort Vermold 1 in der niedrigen Aussaatstärke festgestellt werden. Bis auf den Standort Vermold 1 in der niedrigen Aussaatstärke, der auch den geringsten Feldertrag hervorbrachte, gaben alle Standorte eine positive  $K_{DL}$ -Bilanz wieder. Diese war am Standort

Versmold 2 in der hohen Aussaatstärke mit 258 kg K/ha am höchsten. Auch im Sommeranbau 2014 wurden positive K-Bilanzen bestimmt. Diese ergaben einen  $K_{DL}$ -Überschuss von 242 kg K/ha am Standort Lärz und von 30 kg K/ha am Standort Versmold.

Pflanzen können für Kalium den Unterboden als Nährstoffquelle nutzen. Fleige *et al.* (1983) beschreiben, dass vor allem in trockenen Jahren die Kaliumnachlieferung aus dem Unterboden bis zu 65 % betragen kann, da die Wurzeln Wasser und Nährstoffe aus tiefen Bodenschichten aufnehmen. Zudem ist das Kaliumnachlieferungsvermögen aus Kalifeldspäten in Sand- und Schluffböden sehr hoch. Geht man von einem Gehalt an Kalifeldspäten von durchschnittlich 7 % aus, kann die Kaliumnachlieferung bis zu 26 000 kg K/ha\*0-30 cm Boden betragen (Wulff *et al.* 1998). Finnan & Burke (2013) bestimmten für P und K keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Erntemenge und der Pflanzenaufnahme. Die Autoren schlossen daraus, dass Hanf einen geringeren K-Bedarf als andere Feldfrüchte hat und diesen über die Bodenvorräte decken kann. Eine erhöhte Aufnahme wurde nur bei sehr hohen Kaliumgehalten im Boden nachgewiesen („Luxusaufnahme“). Späte Hanfsorten nehmen mehr Kalium als frühreife Sorten auf, wobei 70-75% davon im Stängel eingelagert werden (Finnan & Burke 2013). Meister *et al.* (1999) erzielten bei einer erhöhten Kaliumdüngung von 207 kg/ha zwar höhere Hanferträge, die sich jedoch nicht für alle angebaute Sorten bestätigen ließen. Die Sorte Fedora, die auch im Praxisversuch dieser Arbeit angebaut wurde, zeigt keine Ertragsunterschiede aufgrund des erhöhten Kaliumangebots.

Scharrer und Schreiber (1943) konnten durch doppelte Kaliumgaben nur eine geringe Ertragssteigerung erzielen, eine dreifache Kaliumgabe bewirkte keinen weiteren Mehrertrag. Neben der Aussaatstärke und der Stickstoffdüngung können auch Bodenunterschiede Bestandesinhomogenitäten verursachen (Zöphel *et al.* 2001a).

## 12.2 Hypothese II: Aussaatstärke

Die Bestandesentwicklung und Höhe des Stängeltrags wird neben der Witterung und Düngung stark durch die Aussaatstärke beeinflusst (Westerhuis *et al.* 2009a). Die in der Literatur beschriebene Saatstärke für Hanf im konventionellen Sommeranbau variiert zwischen 40 und 150 kg/ha, welches einer Pflanzenzahl von 200 bis 750 pro Quadratmeter nach dem Auflaufen entspricht (Van der Werf *et al.* 1995c, Röhrich & Schulz 2000, Graf *et al.* 2006). Für Hanf besteht die Besonderheit des Selbstausdünnungseffektes, der umso stärker auftritt, je höher die Pflanzendichte ist (Van der Werf 1991, Lisson & Mendham 2000, Léon *et al.* 2004). Der Selbstausdünnungseffekt entsteht durch eine größere Variabilität im Pflanzenwuchs bei Hanf, wobei höhere Pflanzen niedrigere überschatten, die schließlich absterben (Van der Werf *et al.* 1995a, Graf *et al.* 2005a, Haverkamp 2014). Die Variabilität wird des Weiteren durch eine ungleichmäßige Aussaatstärke und Pflanzenlücken in den Reihen (Zöphel *et al.* 2001b), sowie hohen Stickstoffgaben beeinflusst (Mediavilla *et al.* 1998a,



Struik *et al.* 2000). Da die Höhe des Selbstausdünnungseffektes von vielen Variablen beeinflusst wird, kann nicht von einer allgemeingültigen Regel ausgegangen werden, die anhand einer Formel berechenbar ist (Weller 1987).

Nach Van der Werf *et al.* (1995a) vereint die optimale Aussaatstärke die Vorteile der hohen Pflanzendichte auf die Faserqualität mit dem negativen Effekt der Ausdünnung. Eine niedrige Aussaatstärke bringt stärkere Stängel hervor, die ab einem Durchmesser von mehr als 10 mm die technische Entholzung erschweren (Graf *et al.* 2005b). In Europa wurden maximale Erträge für den Sommeranbau von Hanf bei Saatstärken zwischen 150 bis 250 keimfähige Samen pro Quadratmeter erzielt (Höppner & Menge-Hartmann 1994, Block 1998, Münzer 1999). Die Ausgangspflanzendichte wird als ackerbauliche Steuergröße angesehen, um eine gute Faserqualität zu erhalten (Van der Werf *et al.* 1995b). Bei einer Pflanzenzahl von 30-90 Pflanzen pro Quadratmetern konnten Struik *et al.* (2000) keinen Selbstausdünnungseffekt mehr nachweisen. In Pflanzendichten zwischen 180 oder 270 Pflanzen pro Quadratmeter konnten sie dagegen eine Ausdünnung über den Wachstumsverlauf bestätigen. Die Stärke des Selbstausdünnungseffektes nahm mit der Höhe der Pflanzendichte zu. Meijer *et al.* (1995) konnten dagegen bei einer Saatstärke unter 200 Pflanzen/m<sup>2</sup> den Selbstausdünnungseffekt nicht mehr feststellen.

Im Winteranbau wurde der Hanf in zwei Aussaatstärken ausgesät: 25 kg/ha und 50 kg/ha, welches einer Körnerzahl von ca. 130 bzw. 260 pro Quadratmeter entspricht. Die Pflanzenzahlen nach dem Auflaufen, betragen an den Standorten Lärz und Versmold 1 zwischen 61 und 73 % des errechneten Solls. Neben der Keimfähigkeit des Saatguts, die Rößler (2012) für die Sorte Fedora mit 81 % angibt, beeinflussen Witterung und Saatbettbereitung die Höhe der auflaufenden Keimlinge. In diesem Versuch wurde die Keimfähigkeit des Saatguts nicht bestimmt, so dass die Höhe der aufgelaufenen Pflanzen durch die Summe der verschiedenen Parameter bedingt ist.

Im Gegensatz zum Sommeranbau, für den Selbstausdünnungsraten von über 70 % auftreten können (Mediavilla *et al.* 1998a, Röhrich & Schulz 2000, Von Franken-Welz 2003, Jankausinè & Gruzdevienè 2011), blieb im Winteranbau 2013/14 der Selbstausdünnungseffekt weitgehend aus und betrug unter 5 %. Nur am Standort Lärz reduzierte sich die Pflanzenzahl in der hohen Saatstärke bis zum Ende des Pflanzenwachstums von 186 auf 120 pro Quadratmeter, welches einer Ausdünnung von 35 % entspricht. Röhrich und Schulz (2000) führten Saatstärkeversuche zwischen 20 bis 80 kg/ha durch. Die geringste Reduktion zeigte sich bei 20 kg/ha (14,2-36,2%), die höchste bei 60 bis 80 kg/ha (72 und 52 %) zum Ende des Anbaus.

Das Ausbleiben des Selbstausdünnungseffektes für die Bestände im Winteranbau, insbesondere in der niedrigen Aussaatstärke von 25 kg/ha, ist möglicherweise mit der geringen Pflanzenzahl von unter 200 Pflanzen/m<sup>2</sup> zu erklären (Meijer *et al.* 1995). Jedoch zeigte auch der Bestand am Standort Versmold 2 in der hohen Aussaatstärke nur eine Ausdünnung von 2 %, obwohl auf der Fläche 304 Pfl./m<sup>2</sup> aufgelaufen waren. Es muss allerdings beachtet werden,

dass die Standardabweichung (SD) der Pflanzenzahlen in den Wiederholungen sehr hoch war. Am Standort Vermold 2 wies die Bestandesdichte mit einer SD von 82 Pfl./m<sup>2</sup> die größte Streuung auf. Die ausgezählte Fläche von einem Quadratmeter und die dreifache Wiederholung stellten sich im Nachhinein als zu gering heraus, um die hohe Variabilität im Hanfbestand adäquat darzustellen. Die eigentliche Reduktion der Pflanzenzahl erfolgte erst über den Winter. Dabei wurde eine Verringerung des Pflanzenbestandes zwischen 25 und 78% festgestellt. Während an den Standorten Lärz und Vermold 1 in der hohen Aussaatstärke zur Ernte mehr Pflanzen pro Quadratmeter standen als in der niedrigen Aussaatstärke, zeigte sich am Standort Vermold 2 der gegenteilige Effekt. Hier verblieben nach dem Winter in der niedrigen Aussaatstärke mehr Pflanzen als in der hohen. Westerhuis *et al.* (2009a) gehen davon aus, dass der Selbstausdünnungseffekt und das Absterben der überschatteten Pflanzen bereits vor der Samenreife abgeschlossen ist. Die Pflanzenreduktion über den Winter kann dadurch nicht mehr mit dem Selbstausdünnungseffekt der Hanfpflanzen begründet werden, sondern resultiert eventuell aus den Einwirkungen der Witterung über diese Zeit. Auch Pasila (2004) bestimmte in der „Dry-line Methode“, bei der Hanfpflanzen im konventionellen Sommeranbau ausgesät, jedoch erst im Frühjahr des Folgejahres geerntet wurden, Verluste über die Standzeit im Winter von 16-30%, z.B. durch Abknicken der Stängel infolge von Pilzbefall, Wind- oder Schneebruch, aber auch Schäden durch Deckung suchende Wildtiere. Auf den Lysimetern konnte im Winteranbau 2013/14 sowie 2014/15 ebenfalls kein Selbstausdünnungseffekt festgestellt werden. Eine Reduzierung der Pflanzenzahlen über den Winter hat hier im Gegensatz zu den Feldversuchen nicht stattgefunden. Eine mögliche Erklärung könnte hierfür sein, dass die Lysimeterstation eingezäunt ist und somit keine Wildtiere den Bestand schädigen können. Des Weiteren ist die Anlage von einer Hecke umgeben, die die Windeinwirkung eventuell verminderte.

Meijer *et al.* (1995) geben an, dass in höheren Aussaatstärken durch die hohe Konkurrenz der Pflanzen um Licht und Nährstoffe geringe Pflanzenhöhen ausgebildet werden. Dieses kann auch im Winteranbau 2013/14 für die Standorte Lärz und Vermold 1 bestätigt werden. Am Standort Vermold 2 wuchsen dagegen in der hohen Aussaatstärke größere Pflanzen. Ursachen dafür könnten in der hohen Variabilität des Bestandes in Bezug auf die Pflanzenhöhe liegen, die sich wie zuvor beschrieben auch in der Pflanzendichte zeigte. Auf den beiden sandigen Standorten Lärz und Vermold 2 konnten aufgrund der hohen Streuung zwischen den Wiederholungen, keine Unterschiede in den Erntemengen bezüglich der unterschiedlichen Saatstärken festgestellt werden. Der lehmige Standort Vermold 1 lieferte keine repräsentativen Erntemengen aufgrund der Bodenverdichtung. Die berechneten mittleren Erntemengen von 28-31 dt/ha für den Standort Lärz und 33-35 dt/ha für den Standort Vermold 2 überschätzen den Ertrag aufgrund der Entnahme in der Feldmitte und der zu kleinen Beprobungsfläche. In einem Folgeprojekt konnte am Standort Vermold anhand der geernteten Rundballen eine Erntemenge von 25 dt/ha bestimmt werden. Auf dieser Grundlage läge die Überschätzung der Erntemengen aufgrund der Quadratmeterernten bei ca. 30 %.

Von Francken-Welz und Léon (2003) fanden signifikante Unterschiede zwischen dem Stängeldurchmesser bei Aussaatstärken von 20 und 40 kg/ha. Dabei wurden in der niedrigen Saatstärke höhere Stängeldurchmesser ausgebildet. Dieses bestätigte sich auch im Winteranbau für die Aussaatstärken von 25 und 50 kg/ha.

In Saatstärkenversuchen im Münsterland bewirkte die Erhöhung der Aussaatstärke eine signifikante Erhöhung der Bruchdehnung (Von Francken-Welz & Léon 2003). Diese konnte nur am Standort Vermold 2 im Winteranbau 2013/14 festgestellt werden. Am Standort Lärz verringerte sich die Bruchdehnung dagegen signifikant in der hohen Aussaatstärke. Im Winteranbau konnte eine signifikant höhere Bruchdehnung gemessen werden als im Sommeranbau 2014, während die Faserbreite, die Zugfestigkeit sowie der Zugmodul geringere Werte einnahmen. Die Messwerte für Faserbreite, Zugmodul und Bruchdehnung des Winter- und Sommeranbaus dieser Arbeit liegen, trotz signifikanter Unterschiede zwischen den Saatstärken, in den Spannweiten der Literaturangaben, die von Müssig *et al.* (2010) zusammengestellt wurden. Die ermittelten Messwerte der Zugfestigkeit fallen im Winter- wie im Sommeranbau dieser Arbeit etwas niedriger als die Literaturangaben aus. Crowley (2001) stellte eine höhere Feinheit der Fasern bei größeren Aussaatstärken fest, welches im Winteranbau 2013/14 nur für die Standorte Vermold 1 und 2 zutrifft.

Im Sommeranbau 2014 wurde der Hanf mit einer Aussaatstärke von 25 kg/ha ausgesät, die unter der Saatstärkenempfehlung von Lohmeyer (1997), Münzer (1999) und Krüger (2000) von 40 kg/ha für die Fasernutzung im Sommeranbau liegt. Zudem war es für den Sommeranbau 2014 nicht möglich, die stark nachgefragte Sorte Fedora für den Standort Lärz zu erhalten, woraufhin auf die Sorte Futura ausgewichen werden musste. Nachdem jährlich neue Länder Hanf wieder anbauen dürfen, ist die weltweite Verfügbarkeit von Hanfsaatgut eingeschränkt. Zusätzlich wurde beobachtet, dass manche Züchtungsorganisationen (v.a. aus Frankreich) ihr Saatgut nicht allen zugänglich machen (Meister *et al.* 1999). Weiterhin ist die Sortenauswahl an Hanf sehr begrenzt, da im Bereich der Züchtung für Hanf wenig gearbeitet wurde (Mediavilla *et al.* 1999).

Zur Ernte wurde am Standort Lärz eine Pflanzendichte von 26 Pfl./m<sup>2</sup> bestimmt, am Standort Vermold von 36 Pfl./m<sup>2</sup>. Dies entspräche einer Ausdünnung von 80,3 bzw. 72,6 %. Allerdings beklagten die Landwirte ein schlechtes Auflaufen des Saatgutes. Im Sommeranbau 2014 wurden weder Keimfähigkeit des Saatgutes noch die auflaufenden Pflanzen pro Quadratmeter bestimmt, so dass keine genauen Aussagen zur Stärke des Selbstausdünnungseffektes gemacht werden können. Ob dieses durch die Saatgutqualität, Saatbettbereitung oder Bodenbeschaffenheiten begründet ist, lässt sich im Nachhinein nicht klären.

Rößler (2012) ermittelte eine Keimfähigkeit für die Sorte Fedora von 81 % und für die Sorte Futura von 90 %. Wenn man diese Werte für den Sommeranbau 2014 verwendet, wären am Standort Lärz 117 Pflanzen der Sorte Futura und am Standort Vermold 105 Pflanzen der Sorte Fedora gekeimt. Mit den zur Ernte ermittelten Pflanzen pro Quadratmeter entspräche dies einer Reduzierung um 77 % bzw. 65 %. Auch Meijer *et al.* (1995) ermittelten für den

Sommeranbau hohe Self-Thinning-Raten von bis zu 77 %: von 350 lebenden Pflanzen zum Reihenschluss, standen nur noch 80 Pflanzen zur Ernte Ende August. Jankauskienè und Gruzdevienè (2011) stellten ebenfalls höhere Ausdünnungsraten der Sorte Futura gegenüber der Sorte Fedora fest. Bei Rößler (2012) ging die Pflanzenzahl kontinuierlich von 140 auf 80 Pflanzen/m<sup>2</sup> von Tag 30 bis Tag 140 zurück, welches einer Ausdünnung von 41% entspricht. Am Standort Lärz wurden aufgrund der geringen Pflanzendichte Stängeldurchmesser von bis zu 12 mm ausgebildet, die eine technische Aufbereitung erschweren. Crowley (2001) bestimmte ebenfalls in niedrigen Aussaatstärken von 20-30 kg/ha stärkere Stängeldurchmesser von mehr als 10 mm.

Zwischen den Wärme- und Niederschlagssummen der beiden Standorte konnten keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden, so dass die größeren Pflanzenhöhen und der daraus gewonnene Mehrertrag am Standort Lärz vermutlich durch die unterschiedlichen Sorten begründet ist. Léon *et al.* (2004) erfassten sortenbedingte Ertragsunterschiede von bis zu 50 % und geben eine geringe Bedeutung der Standorte auf das Ertragspotential an. Graf *et al.* (2005b), Thygesen (2006) und Consentino *et al.* (2013) stellten ebenfalls höhere Erträge der Sorte Futura gegenüber der Sorte Fedora fest. Die aus den Quadratmeterernten berechneten Erträge betragen am Standort Vermold im Mittel 68 dt/ha und am Standort Lärz 127 dt/ha. Geht man wie im Winteranbau von einer ca. 30 % Überschätzung der Handerntens aus, entspräche dieses Erträgen von 48 und 89 dt/ha, die sich im Rahmen der von Mediavilla *et al.* (2001) genannten Stroherträge von 50-180 dt/ha befinden. Die hohen Stängeldurchmesser am Standort Lärz sprechen jedoch dafür, dass die gewählte Aussaatstärke von 25 kg/ha für den Sommeranbau zu niedrig war, um eine ausreichende Qualität zu erreichen. Demnach kann der Landwirt die Stängeldicke über die Saatstärke regulieren (Léon *et al.* 2004).

## **12.3 Hypothese III: Sickerwassermenge und Nährstoffaustrag**

### **12.3.1 Sickerwassermenge**

Die Niederschlagsmenge und -verteilung beeinflussen den Wasserhaushalt des Bodens und die Höhe der drainierten Bodenlösung (Oliveira *et al.* 2002). Die Wasserbilanz eines Standortes wird durch die Niederschlagsmenge, Evapotranspiration, Sickerwassergeschwindigkeit und viele weitere Faktoren beeinflusst (Wichtmann & Dannowski 2003). Für die Grundwasserneubildung stellt das Sickerwasser eine wichtige Größe dar. Neben der Menge, sind die darin gelösten Stoffe für die Qualität des Grundwassers entscheidend.

Im Lysimeterexperiment wurde der Hanf auf vier Kastenlysimetern angebaut, deren Bodenart als sandiger Lehm mit einer Trockenrohdichte von 1,5 g/cm<sup>3</sup> im Oberboden und 1,8 g/cm<sup>3</sup> im Unterboden von Meissner (1998) beschrieben wird. Zum Vergleich der Sickerwassermengen und Nährstoffausträge wurden zwei Schwarzbrachen und vier Lysimeter des Teilversuches „Integrierten Landbau“ mit verschiedenen Fruchtfolgerotationen herangezogen.

Im Winteranbau 2013/14 wurden zwei der Hanflysimeter nicht gedüngt, zwei weitere erhielten die auch im Feldversuch applizierte Stickstoffmenge von 80 kg N/ha.

Während unter den ungedüngten Lysimetern im Frühjahr Sickerwasser aufgefangen werden konnte, wurde aus den mit 80 kg N/ha gedüngten Lysimetern kein Sickerwasser gebildet. In der ungedüngten Variante wurde weniger Pflanzenmasse ausgebildet, die möglicherweise weniger Wasser verdunstete. Die Fruchtfolgen des Integrierten Landbaus lieferten im Trend mehr Sickerwasser als die Hanflysimeter, der jedoch nicht als signifikant verifiziert werden konnte. Aus den Schwarzbrachen wurde dagegen signifikant mehr Sickerwasser aufgefangen. Die Sickerwassermengen der Schwarzbrachen zeigen eine mittelstarke Korrelation mit den Niederschlagsmengen, wogegen bis auf eine Ausnahme, die mit Hanf bepflanzten Lysimeter keine Korrelation aufweisen. Tripolskaja *et al.* (2016) bestätigen die schwache Korrelation zwischen Niederschlag und Sickerwasser in Lysimeterexperimenten mit sandigen Lehm Böden in Litauen. Im Winteranbauversuch von Hanf konnte erst im Februar und März des Folgejahres Sickerwasser gemessen werden, während im Sommeranbau 2014 gar kein Sickerwasser aufgefangen werden konnte. Im Sommeranbau 2014 wurden vier Lysimeter mit Hanf bepflanzte, von denen zwei mit 80 kg N/ha und zwei weitere mit 120 kg N/ha gedüngt wurden. Die beiden mit 80 kg N/ha gedüngten Lysimeter wurden im Sommer vorzeitig geerntet, um einen erneuten Winteranbau zu ermöglichen. Die beiden anderen Lysimeter lagen bis zum Frühjahr brach. Trotz der Brache brachten diese beiden Lysimeter erst im Februar wieder Sickerwasser hervor. Es konnte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Hanflysimetern im Sommeranbau noch zu den Lysimetern der Fruchtfolgerotation des Integrierten Landbaus nachgewiesen werden. Möglicherweise wurde dem Boden durch den Hanfanbau so viel Wasser entzogen, dass die nutzbare Feldkapazität erst im Frühjahr des Folgejahres erreicht wurde. Generell verbrauchen Winterzwischenfrüchte viel Wasser, wodurch sich die Sickerwassermenge und der Nitrataustrag reduzieren (Wagger & Meggel 1988, Hein & Waschl 2007). Der Verlauf der monatlichen Sickerwassermenge unterscheidet sich je nach angebauter Kultur. Bei Wintergetreide erfolgt eine Abnahme von März bis Juni, nach dem Abreifen bzw. der Ernte nimmt die Sickerwassermenge wieder zu (Kuderna *et al.* 2014). Dieser Verlauf konnte ebenfalls im Winterweizenanbau des Teilversuches „Integrierten Landbau“ festgestellt werden.

## **12.3.2 Nährstoffaustrag**

### **12.3.2.1 Nitrat-Stickstoff**

Stickstoff wird in mineralisierter Form nur als Ammonium im Boden festgehalten, wird jedoch unter den klimatischen Bedingungen in Deutschland sehr rasch in Nitrat umgewandelt. Nitrat unterliegt aufgrund der negativen Ladung einer schnellen Auswaschung mit dem Sickerwasser in tiefere Bodenschichten bzw. ins Grundwasser. Von den in Humusform vorliegenden Stickstoffbindungen werden im Jahr zwischen 1 und 3 % mineralisiert, welches

bei einem fruchtbaren Ackerstandort je nach Jahreswitterung zwischen 50 und 150 kg Stickstoff/ha betragen kann (Heyland 1991).

Die Trinkwasserversorgung in Deutschland wird zu fast 70 % aus Grund- und Quellwassern gedeckt. Daneben werden ca. 30 % aus Oberflächengewässern, wie Seen und Talsperren entnommen (Umweltbundesamt 2018). In der EU-Grundwasserrichtlinie 2006/118/EG wird die Qualitätsnorm für Grundwasser auf 50 mg Nitrat (11,3 mg Nitrat-N/l) festgelegt. Im Nitratbericht aus dem Jahr 2016 betrug der Anteil der Messstellen mit Nitratgehalten von mehr als 50 mg/l ca. 28 %. Über 50 % der Stickstoffeinträge in Oberflächengewässer sind durch die Landwirtschaft bedingt. Die steigende Intensivierung der Viehhaltung hat die Landwirte bewegt, das Aufbringen von organischen Düngern als einen Prozess der Abfallentsorgung anzusehen (Smith 1993). Hohe Nitratgehalte im Boden aufgrund hoher N-Gaben im Herbst, die über den Winter verschwinden, werden nach Zhang *et al.* (2004) hauptsächlich mit der Frühjahrsschmelze ausgetragen. Eine Düngung bis 170 kg N/ha bewirkte keine messbare Kontamination des Grundwassers, welches Lopez-Bellido *et al.* (1996) und Sestak *et al.* (2014) für Düngungen bis 150 kg N/ha bestätigen.

Das meiste Sickerwasser wird im Winter und Frühling gebildet (Amlinger *et al.* 2006), wodurch nach Shepherd *et al.* (1993) die Gefahr der Nitrat auswaschung besonders hoch ist. Diese besteht aufgrund der Anreicherung von Nitrat, welches nach der Ernte im Boden verbleibt, zusammen mit dem, welches durch Mineralisation neu entsteht. Dem Boden wird beim Einbringen von Ernterückständen durch Pflügen leicht verfügbare organische Substanz unter gleichzeitiger Belüftung zugeführt. Dieses kann einen Mineralisierungsschub von bis zu 50 kg N/ha im Oberboden bewirken (Mc Lenaghan *et al.* 1996). Der gebildete Nitratstickstoff reichert sich im Boden an (Power & Schepers 1989). Wenn der Acker brach bleibt und das Nitrat somit nicht durch Pflanzen aufgenommen werden kann, kann es in tiefere Bodenschichten verlagert bzw. ins Grundwasser ausgetragen werden (Cameron & Scotter, 1986, Francis *et al.* 2003).

Die Austräge über das Sickerwasser werden durch einen effektiven Zwischenfruchtanbau minimiert, durch den ein Teil des mineralisierten Stickstoffs durch den Einbau in die Pflanzensubstanz zurück in den organischen Pool überführt wird (Neilsen & Jensen 1985, McCracken *et al.* 1987, Martinez & Guiraud 1990).

In Sandböden sind die Mineralisationsraten aufgrund des hohen Porenvolumens und der besseren Belüftbarkeit des Bodens größer als in Schluff- und Tonböden, in denen der Abbau von organischer Substanz durch Bindung an Tonminerale und Sesquioxide, sowie häufiger auftretender anaerober Verhältnisse, gehemmt ist (Kastler *et al.* 2015). Die Nitrat auswaschung hängt sehr stark von der Sickerwasserbildung und der Nitratkonzentration der Bodenlösung ab (Amlinger *et al.* 2006). Auf lehmigen Sandböden, mit einer Feldkapazität von nur 20 %, erfolgt eine Nitratverlagerung um 30 cm bereits bei einer Niederschlagsmenge von 60 mm (LWK Niedersachsen 2006). Die Mineralisierungsrate ist nahe dem Gefrierpunkt sehr gering und steigt mit einer Temperaturzunahme um 10°C um das 2 bis 3-fache an

(Blume *et al.* 2010). Während der Vegetationsperiode geben Neeteson (1995) eine Nettomineralisierung zwischen 50 und 150 kg N/ha an, die bei Wassersättigung oder extremer Austrocknung gehemmt wird (Amlinger *et al.* 2006).

Im Lysimeterexperiment wurden in den Monaten Februar und März die höchsten NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen bestimmt. Auch Zhang *et al.* (2004) bestätigten N-Verluste mit dem Ausstrag über das Sickerwasser im Frühling mit dem Einsetzen des Tauens, während Mariotti *et al.* (2015) als auch Sturm und Kiefer (2005) die höchsten Nitratkonzentrationen von September bis Dezember bestimmten. Im Maisanbau beschreiben Kuderna *et al.* (2014) ein Maximum der Nitratauswaschung im Mai und Juni von 18 kg/ha nach Umbruch der im Herbst gedüngten Zwischenfrucht mit anschließender Güllegabe im Frühjahr. Mais beginnt erst Mitte/Ende Juni mineralischen Stickstoff aufzunehmen, wohingegen die Stickstoffmineralisierung durch steigende Bodentemperaturen bereits im April zunimmt (Kuderna & Weinberger 2014). Dieses konnte anhand der Lysimeter mit den Fruchtfolgen des Integrierten Landbaus nicht bestätigt werden, bei dem die Nitratgehalte des Sickerwassers während des Maisanbaus nicht über 1 kg/ha stiegen. Aus den beiden Schwarzbrache-Lysimetern wurden zwischen 56 und 324 kg NO<sub>3</sub>-N/ha und Jahr ausgetragen, so dass von noch höheren Mineralisationsraten ausgegangen werden kann. Die Austräge waren aufgrund höheren Sickerwassermengen in den Wintermonaten höher als in den Sommermonaten.

Strebel *et al.* (1989) konnten unter Sandböden mit einer Fruchtfolge von Getreide–Zuckerrüben–Kartoffeln mit einer Düngung von 120 kg N/ha Düngung eine NO<sub>3</sub>-N-Konzentration von 22-30 mg/l messen. Im Vergleich brachte dieselbe Fruchtfolge mit Winterzwischenfrucht nach dem Getreideanbau geringere NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen von 14-16 mg/l hervor. Im Lysimeterexperiment wurden in der Fruchtfolge des integrierten Anbaus bei Zuckerrüben ohne Vorfrucht dagegen mit bis zu 62 mg/l, deutlich höhere Stickstoffkonzentrationen bestimmt. Unter Schwarzbrache wurden NO<sub>3</sub>-N-Konzentrationen bis zu 93 mg/l und Austräge über den 20-monatigen Versuchszeitraum von über 200 kg N/ha gemessen. Dieses deckt sich mit den Ergebnissen von Knappe *et al.* (2002), die unter Brache hohe Mineralisationsraten und dadurch bedingt hohe N-Konzentrationen im Sickerwasser bestimmten. Stauffer und Spiess (2001) erhoben unter Schwarzbrache Konzentrationen bis 45 mg NO<sub>3</sub>-N/l und eine Auswaschung bis 358 kg N/ha\*a. Suarez-Tapia *et al.* (2018) ermittelten die höchsten Nitratverluste (bis 80 mg/l) in einem Lysimeterversuch mit Winterweizen im Dezember und Januar, aufgrund hoher Sickerwassermengen. Der Winterweizen wurde erst spät im Herbst nach Zuckerrüben gesät, wodurch die Pflanzen vor dem Winter wenig Stickstoff aus dem Boden aufnahmen. Durch eine Vorverlegung der Aussaat von Mitte September auf Mitte August, verringerte sich nach Suarez-Tapia *et al.* (2018) die Gefahr der N-Auswaschung durch ein stärkeres Wurzelsystem, wodurch im Herbst mehr Stickstoff aufgenommen werden konnte. Bis zur Ernte nahmen die Pflanzen bis zu 35 kg mehr N/ha auf als spät gesäte Varianten. Sieling *et al.* (1996) beschreiben die Stickstoffaufnahme von Winterweizen vor dem Winter mit nur 15 kg N/ha.

Wantulla *et al.* (1988) ermittelten die Maxima der N-Mineralisierung im Herbst (September–Oktober) und in der Zeit von April bis Juni, sobald es zu einer Wiedererwärmung der feuchten Böden kommt. Das Frühjahrsmaximum fällt häufig in eine Zeit mit geringer N-Aufnahme durch die Pflanzen (v.a. Mais). Feldfrüchte, die im Herbst viel mineralisierten Stickstoff aufnehmen, können den Nitrataustrag um 45-47 % pro Jahr senken (Tripolskaja *et al.* 2014).

Die Stickstoffmineralisierung ist nach Anken (2003) ein komplexer Prozess, der von vielen Faktoren (z.B. Bodentemperatur, Wassergehalt, Fruchtfolge usw.) beeinflusst wird und schwierig einzuschätzen ist. Auch mit Hilfe von verschiedenen Stickstoffmodellen (CANDY; MINERVA usw.) konnten die Ergebnisse von langjährigen Lysimeterversuchen nicht zuverlässig simuliert werden. Entlang von Regenwurmgingen wurden erhöhte Nitratkonzentrationen gemessen, da an den Wänden durch die Beschichtung mit Schleim und anderen organischen Substanzen die Mineralisierung schneller verläuft. Dadurch gibt es im Boden eine hohe Variabilität bezüglich der Stickstoffmineralisierung (Anken 2003). Schmied *et al.* (2000) ermittelten unter konventioneller Bodenbearbeitung mit dem Pflug, dass 75 % des Bodenwassers über präferenzielle Fließwege in die Tiefe verfrachtet werden und nicht über die Bodenmatrix. Dadurch weisen die Wasserdurchflussmengen eine hohe Variabilität auf, die von 0,7 m/a (Matrixfluss) bis 0,5 m/d (Präferenzieller Fluss) reichen. Geht man von dem Matrixfluss aus, verweilt das Sickerwasser in der Dränzone ca. 2 Jahre, so dass N-Austräge nicht im Jahr ihrer Entstehung auftreten, sondern mit zeitlicher Verzögerung von bis zu mehreren Jahren (Haferkorn 2000).

### **12.3.2.2 Phosphor**

Aufgrund der verstärkten Nahrungsmittelproduktion und der Intensivierung der Landwirtschaft mit verstärktem Düngereinsatz, kam es in den letzten Dekaden zu einer Anreicherung von Phosphor in landwirtschaftlich genutzten Böden. Die hohe Verfügbarkeit von Phosphor führt zu einem erhöhten Risiko der Auswaschung in Oberflächengewässer und das Grundwasser. Eine Eutrophierung mit Phosphor führt in Frischwasserkörpern und marinen Ökosystemen zu einem verstärkten Algenwachstum, welches eine hohe Sauerstoffabnahme zur Folge hat (Edwards & Chambers 2002, Delgado & Scalenghe 2008). Von der ausgebrachten Düngemenge bleibt nur ein geringer Anteil pflanzenverfügbar, ein erheblicher Anteil wird in P-Vorratsformen überführt und fest an Bodenkolloide gebunden (Ahl *et al.* 2018). Die Betrachtung von Oberbodenstudien allein ist inadäquat, um die P-Austräge für Böden zu bestimmen. Die hohe Bindungskapazität des Unterboden zeigt eine größere Wichtigkeit für die P-Auswaschung als der P-Gehalt des Oberbodens, gerade in sandigen Böden (Anderson *et al.* 2013). Bei den Routine-Verfahren zur Erfassung der Düngeempfehlungen von P und K wird nur der Oberboden untersucht, wobei eine mögliche Nährstoffnachlieferung aus dem Unterboden unberücksichtigt bleibt (Fleige *et al.* 1983).



Während des Abbaus von organischen Düngern, die eine sehr variable P-Konzentration besitzen (10-700 mg/l), werden zeitgleich weitere chemische Elemente (N, K, Ca) mineralisiert, die ausgewaschen werden und eine Belastung darstellen können (Tripolskaja *et al.* 2016). Wirtschaftsdünger werden überwiegend nur nach ihrem Stickstoffgehalt ausgebracht, so dass es zu einer P-Akkumulation und damit zu einer Austragsgefahr kommen kann (Rupp *et al.* 2018). Durch die langjährige Düngung in der Landwirtschaft haben sich die Gehalte (Bach & Frede 1998), sowie die Verfügbarkeit (Rowell 1994) von Phosphor und Kalium im Boden erhöht.

Auch die 2015 nach unten hin korrigierten Gehaltsklassen der VDLUFA (1998) reichen nicht aus, um die Gefahr der Auswaschung ins Grundwasser zu bannen. Daher muss die Düngung mit Phosphor kritisch hinterfragt werden. Vor allem müssen geringere P-Gehalte des Bodens das höchste Ziel vor Ertrags- und Produktionsmaxima sein.

In sandigen Lehmböden schwanken die Boden Phosphor-Gehalte im Mittel zwischen 50 und 250 mg/kg Boden, bestimmt nach der Doppellactat-Methode (Rupp *et al.* 2018). Die Phosphor-Auswaschung wird neben der Bodenart, den P-Gehalten im Boden, der Nutzung und der applizierten Düngemenge, stark von den klimatischen Bedingungen und des Wasserregimes beeinflusst (Godlinski 2005). Die P-Konzentration der Bodenlösung ist aufgrund der geringen Löslichkeit von P-Verbindungen sehr gering (0,05 bis 3 mg P/l, Schilling 2000). In übersorgten Standorten kann Phosphat bevor es in Bindung geht, verlagert werden (Kastler *et al.* 2015).

Starkregenereignisse begünstigen die P-Auswaschung. Insbesondere auf tonigen Standorten können sich stabile Makroporen bilden, in denen gelöste und partikuläre Nährstoffe in bevorzugten Fließwegen (Preferential Flow) transportiert werden. Eine Sorption des Phosphors findet aufgrund der schnellen Fließgeschwindigkeit nicht mehr statt, wodurch eine Verlagerung in den Unterboden erfolgt, wodurch sich wiederum das Risiko einer Grundwasserbelastung erhöht (Godlinski 2005).

Die Austräge aus lehmigen Böden sind, aufgrund der höheren P-Sorption, geringer als aus sandigen Böden, deren P-Konzentrationen um 1 mg/l (Anderson *et al.* 2007, Rupp *et al.* 2018) betragen.

Während des Lysimeterexperiments im Hanfanbau wurden geringere Konzentrationen von 0,08 mg/l ermittelt. Zwischen den P-Konzentration und P-Gehalten der Bodenlösung der unterschiedlichen Nutzungsformen konnten keine statistisch belegbaren Unterschiede festgestellt werden, noch folgten sie einem jahreszeitlichen Trend. Auch Versuche von Tripolskaja *et al.* (2016) brachten Sickerwasserkonzentrationen von 0,001 bis 0,01 mg P/l hervor.

Während Godlinski (2005) 13 % des Niederschlags an Sickerwasser in der Dauerbrache feststellte, wurden im Lysimeterversuch unter Schwarzbrache über 40 % des Niederschlags als Sickerwasser aufgefangen, welches mit dem kompletten Fehlen an Vegetation zu erklären ist. In der Brache kommt es zur Ausbildung von bevorzugten Fließwegen durch fehlende

Bearbeitung. Das Sickerwasser zeigte einen typischen jahreszeitlichen Gang, mit hohen Austrägen im Winter und keiner oder niedriger Neubildung im Sommer. Godlinski (2005) gibt maximale Phosphor-Austräge mit 0,72 mg/l an, die sich mit den hier dargestellten Ergebnissen aus dem Lysimeterversuch decken. Ebenfalls in Übereinstimmung wurden die höchsten P-Konzentrationen im Winter am Ende der Sickerwasserperiode und im Sommer nach höheren Regenereignissen bestimmt. Weiter beschreibt Godlinski (2005), dass Pflanzen bei Phosphormangel den Unterboden als Quelle nutzen. Sie stellte eine Zunahme der  $P_t$ -Gehalte und der verfügbaren Formen im Oberboden fest, wobei der Phosphor durch die Pflanzenwurzeln wieder in den Oberboden transportiert wurde. Die gemessenen Phosphorgehalte von 1,5 – 14,5 mg/100 g Boden decken sich mit denen der Feldversuche dieser Arbeit. Auch Sestak *et al.* (2014) geben  $P_t$ -Gehalte für den Oberboden eines Lehmbodens mit 7,7 mg P/100 g Boden an. Durch diesen Mechanismus lässt sich möglicherweise die Zunahme der Phosphorgehalte im Oberboden von der Aussaat bis zum Wachstumsende auf den Versuchsflächen im Winteranbau 2013/14 erklären. Der Anteil an  $P_{org}$  schwankt zwischen 20-80 % des  $P_t$ . Schwankungen im saisonalen Verlauf können durch die Löslichkeit begründet sein. Die P-Konzentration der Bodenlösung liegt für gedüngte Böden zwischen 0,001 und 0,1 mg/l. Die P-Auswaschung erfolgt hauptsächlich über Makroporen > 100  $\mu$ m. Durch den präferentiellen Fluss, bewegt sich das Wasser im Boden entlang von bevorzugten Fließwegen. Dadurch wird das Bodenwasser nur teilweise ausgetauscht, wodurch sich die Gefahr der Auswaschung erhöht. Ebenfalls gibt es in tonigen und schluffigen Böden den Makroporenfluss. Makroporen entstehen durch Wurzeln oder Bodentierchen, aber auch durch Quellen und Schrumpfen (Godlinski 2005) gebildet.

Neben dem pflanzenverfügbaren Phosphor ( $P_{DL}$ ) kann für die Pflanzen auch der schwerer verfügbare Phosphor von Bedeutung sein, der mit den herkömmlichen Bestimmungsmethoden nicht erfasst wird. Jedoch hängt die tatsächliche P-Aufnahme der Pflanzen von weiteren Faktoren wie Witterung, Pflanzenart, Wurzelsystem und dem  $P_t$ -Gehalt des Unterbodens ab. Die P-Düngung zeigte eine relativ geringe Wirkung auf die Erträge von verschiedenen Kulturpflanzen in einem 40jährigen Dauerversuch (Stumpe *et al.* 1994). Bei tiefer Durchwurzelung kann auch Phosphor aus dem Unterboden verfügbar gemacht werden. Nach Stumpe *et al.* (1994) ist eine P-Gabe von 50% des Entzuges ausreichend, um hohe Erträge zu erhalten und den  $P_{DL}$ -Gehalt auf einem Niveau von 5,5 bis 6 mg/100 g Boden zu halten.

Die in der Landwirtschaft verabreichten Düngemengen übertreffen oft den P-Entzug und haben zu einer P-Anreicherung im Boden geführt, die kritisch zu betrachten ist. Es gibt eine anhaltende Diskussion über die Höhe der Bodengehaltsklasse C für Phosphor, die den pflanzenverfügbaren Teil widerspiegelt. Um die bisherigen P-Gehalte der Gehaltsklasse C aufrechtzuerhalten, die bisher in Abhängigkeit von Bodenart, pH-Wert usw. betrachtet wurden, sind oft Düngermengen erforderlich, die den Entzug durch die Pflanzen deutlich übertreffen. (Stumpe *et al.* 1994). Auch Merbach *et al.* (2000) beschreiben ein hohes P-Nachlieferungs-

vermögen aus dem Boden. Die herkömmlichen Methoden zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphors wie die DL-Extraktion sind nicht ausreichend geeignet, um dieses zu erfassen. Steffens (2009) fordert deswegen eine Verringerung der Phosphorgehalte für die Bodenklasse C von 5-9 mg P/100 g Boden auf 3-6 mg P/100 g Boden, um einer Phosphoranreicherung entgegenzuwirken.

### 12.3.2.3 Kalium

Kalium ist ein mobiles Ion im Boden, wodurch signifikante Mengen durch den Austrag mit dem Sickerwasser verloren gehen können. Jedoch wird dieser Tatsache nicht so viel Aufmerksamkeit geschenkt, da der Austrag von Kalium nicht direkt eine Eutrophierung hervorruft, wie z.B. von Nitrat oder Phosphat (Alfora *et al.* 2004). Die K-Konzentration des Sickerwassers ist über das Jahr relativ konstant, außer zu Beginn der Sickerwasserlieferung, wenn der Abfluss durch Makroporen beeinflusst ist (Wong *et al.* 1992, Alfaro *et al.* 2004), welches sich ebenfalls im Lysimeterexperiment bestätigte. Der Anteil an Kali-Feldspäten beträgt in Sand- und Schluffböden ca. 7 %, welches einen Gesamt-K-Gehalt von bis zu 26 t/ha für den Oberboden ausmachen kann (Wulff *et al.* 1998). Für einen Lössböden in Sachsen beschreiben Barth *et al.* (2001) Kaliumvorräte in der Ackerkrume von 72 t/ha. Auch geringe Verwitterungsraten können eine hohe Kalium-Freisetzung bedingen. Der höchste Kaliumaustrag findet aufgrund der höheren Sickerwassermengen im Winter statt. Für Trinkwasser gilt die Grenze von 12 mg K/l (Wulff *et al.* 1998). Die Verwendung von organischen Düngern kann den Gehalt an austauschbarem Kalium im Boden erhöhen, welcher wiederum die Höhe des Austrages bedingt (Rowell 1994). Der Ernteertrag von Gerste und Roggen auf Sandböden wurde in einem 7-jährigen Feldversuch von Wulff *et al.* (1998) nicht durch den  $K_{DL}$ -Gehalt im Boden als auch durch die K-Düngung beeinflusst, wodurch die Ergebnisse von Sparks *et al.* (1980) und Davis *et al.* (1996) bestätigt wurden. Optimale Erträge wurden bei  $K_{DL}$ -Bodengehalten zwischen 60 und 80 mg/100 g Boden erreicht. Die  $K_{DL}$ -Gehalte der sandigen Böden während der Feldversuche im Winteranbau 2013/14 und Sommeranbau 2014 lagen mit 4 und 10 mg K/100 g Boden deutlich unter diesen Werten. Werden Kaliumgaben aus der Düngung nicht von den Pflanzen genutzt, können sie aus der Krume in den Unterboden ausgewaschen werden. Unter trockenen Witterungsbedingungen kann dieser wieder als K-Quelle dienen (Kuhlmann 1988). Etwa 10-20% des Kaliums, welches vom Getreide aufgenommen wird, stammen aus der Bodentiefe von 30-60 cm (Wulff 1996). Sandlöss besitzt eine hohe K-Nachlieferung aus dem Tonmineral Illit (Andersson *et al.* 2007). Sogar nach 40 Jahren ohne K-Düngung, konnten Stumpe *et al.* (1989) noch eine K-Nachlieferung von 65 kg K/ha\*a nachweisen.

Der K-Austrag steht in Zusammenhang mit der Bodentextur und der Bodenart (Alfaro *et al.* 2004). Malavolta (1985) und Dassannayake (1990) erwarteten höhere K-Austräge aus sandigen als aus tonigen Böden, wobei sie die höchsten K-Austräge aus lehmigen Böden bestimmten. Die Kaliumkonzentration des lehmigen Bodens lag zwischen 25,5 und

36,6 mg/l. Unter Sand wurden geringere Konzentrationen zwischen 2,5 und 3 mg K/l gemessen. Dagegen fanden Alfaro *et al.* (2004) die höchsten K-Verluste aus Tonböden, die sie mit dem Austrag über präferentielle Fließwege erklärten. In Versuchen nach Gülleausbringung verfärbte sich das Sickerwasser, wodurch die Autoren auf eine sehr kurze Verweilzeit im Boden schlossen. Barth *et al.* (2001) bestimmten unter einem Lössboden Konzentrationen zwischen 20-25 mg K/l. Während des Lysimeterexperimentes brachten die Lysimeter unter Hanfanbau aus sandigem Lehm über den Versuchszeitraum von 20 Monaten Konzentrationen zwischen 0,7 und 9,1 mg K/l hervor, welches sich mit den Ergebnissen von Sestak *et al.* (2014) aus der gleichen Bodenart deckt. Die Konzentrationen der Schwarzbrachen wiesen im Lysimeterexperiment Werte zwischen 0,8 und 4,2 mg/l auf. Aufgrund der höheren Sickerwasserrate der Schwarzbrachen summieren sich die Kaliumausträge auf 3,6 bis 7,3 kg K/ha\*a, wohingegen die der Hanflysimeter zwischen 0 und 1,8 kg K/ha\*a betragen. Die Fruchtfolgerotationen des Integrierten Landbaus brachten jährliche Kaliumausträge zwischen 0,2 und 2,3 kg/ha\*a hervor. In Versuchen von Meissner *et al.* (1998) ergaben sich aus Dauerbrachen jährliche Austräge von 2,9 bis 11,1 kg K/ha\*a und aus Fruchtfolgerotation zwischen 4,1 und 12,4 kg K/ha\*a, wobei die Höhe der Austräge abhängig von der jährlichen Niederschlagsmenge war. Zwischen den verschiedenen Bearbeitungsformen (Dauerbrache, Fruchtfolge mit Brache und Fruchtfolge ohne Brache) konnten Meissner *et al.* (1998) keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Kaliumausträge ermitteln. Dagegen ergab das Lysimeterexperiment einen signifikanten Unterschied zwischen den K-Austrägen aus den Schwarzbrachelysimetern und denen des Hanfanbaus sowie denen des Integrierten Landbaus. Möglicherweise sind die Unterschiede zwischen den Ergebnissen von Meissner *et al.* (1998) und denen dieser Arbeit im Vergleich der Fruchtfolgen mit Dauer- bzw. Schwarzbrache begründet. Gegenüber der Dauerbrache, auf der wild aufgelaufene Samen wachsen dürfen, wird die Schwarzbrache permanent vegetationsfrei gehalten, so dass Kalium nicht über die Vegetation aufgenommen werden kann. Aus den Schwarzbrachen fällt aufgrund der fehlenden Transpiration durch die Pflanzen mehr Sickerwasser an, wodurch auch mehr Nährstoffe ausgetragen werden können.

#### **12.4 Hypothese IV: Frosteinwirkung auf die Faserqualität**

Bei der Fasergewinnung aus Industriehanf spielen für eine hohe Wertschöpfung zum einen der Ertrag und zum anderen die Faserqualität eine wichtige Rolle. Nach Röhricht und Schulz (2000) sollen Hanfsorten für die Fasergewinnung einen hohen Stängeltrug mit hohem Fasergehalt aufweisen, sowie einen niedrigen Stängeldurchmesser besitzen. Niedrige Aussaatstärken und eine Verlängerung der Wachstumszeit führen zu stärkeren Stängeln, die die Faseraufbereitung erschweren. Zudem sollten sich die Fasern gut vom Holzteil ablösen lassen (Entholzbarkeit) und einen geringen Gehalt an Faserkittsubstanzen aufweisen (Lignin, Pektin, Hemizellulosen) (Mediavilla *et al.* 1999).

Die mechanischen Qualitätseigenschaften der Hanffasern werden insbesondere durch die Wachstumsbedingungen bestimmt. Für diese stellt die Wasserverfügbarkeit einen limitierenden Faktor dar und spielt vor allem im Kontext des Klimawandels eine wichtige Rolle (Abot *et al.* 2013). Der beste Erntezeitpunkt für eine gute Faserqualität im Sommeranbau wird während oder kurz nach der Blüte, vor der Samenreife, beschrieben. Mit steigendem Reifeprozess verholzen auch die Faserzellen und die Reißfestigkeit nimmt ab. Der Blühbeginn ist neben der Tageslänge von der Niederschlagsmenge abhängig. In trockenen Jahren beobachteten Amaducci *et al.* (2008a) eine früher einsetzende Blüte.

Roller (2009) verlagerte den Erntezeitpunkt von August auf November. Dies hat den Vorteil, dass die Hanfpflanzen ihre Blätter vollständig abgeworfen haben. Dadurch ist eine Trennung von Fasern und Schäben einfacher durchzuführen. Ein großer Nachteil besteht im ausfallenden Samenertrag, der als Unkrautpotenzial auf dem Feld verbleibt. Roller (2009) konnte in seinen Versuchen keine signifikanten Unterschiede der Qualitätsparameter zwischen dem frühen und dem späten Erntetermin feststellen.

Bei der in Finnland angewendeten „Dry-Line-Methode“ lassen sich die Fasern bei der Aufbereitung leichter vom Holzteil lösen, bedingt durch den mechanischen Stress, der durch das Gefrieren des Wassers in den Stängeln entsteht (Pasila 2004, Nykter 2006). Während des Winters wiederholt sich der Prozess des Gefrierens und Auftauens mehrere Male, so dass es zu einer Auflösung der Kittsubstanzen kommt, wodurch die Fasern eine bessere Freilegbarkeit aufweisen. Im Vergleich dazu weisen im Herbst ohne Frosteinfluss geernteten Pflanzen, fest zusammengelagerte Faserzellen auf. Im Frühjahr sind die Pflanzen durch die geringe Luftfeuchtigkeit getrocknet und können gleich in Ballen gepresst werden. Die frostgetrockneten Fasern sind relativ resistent gegen Verschimmelung aufgrund des Nährstoffabbaus während der Röste (Kymäläinen & Pasila 2000, Kymäläinen *et al.* 2001, Koivula *et al.* 2004).

In Skandinavischen Ländern sind die Trocknungskosten vor allem für Hanf im Herbst intolerabel hoch (Pasila 2004). Meistens kann eine Feldröste nicht gewährleistet werden, da klimatische und agronomische Bedingungen die Zeit nicht ermöglichen. Da die Faserverarbeiter die Fasern nicht alle zeitgleich aufbereiten können, entsteht ein Lagerproblem, dass durch hohe Restfeuchten im Hanfstroh bei nicht ausreichender Röste die Gefahr der Verschimmelung birgt. Die relative Luftfeuchtigkeit im September und Oktober erreicht oft hohe Werte von 80 %. Ein Hauptproblem bei der Frühjahrsernte ist das Risiko eines unkontrollierbaren Qualitätsverlusts, aufgrund eines Pilzbefalls bei feucht-warmen Witterungsbedingungen im Herbst. Ebenso werden abgeknickte und zu Boden gedrückte Stängel über den Winter zerstört, wodurch die Reduzierung der Pflanzen pro Quadratmeter über den Winter begründet ist (Pasila 2004). Auch im Winteranbau 2013/14 wurde eine Verringerung der Pflanzahlen bis zu 30 % über den Winter festgestellt.

Die Ernte auf gefrorenem Ackerland im zeitigen Frühjahr ist von Vorteil, da eine Bodenverdichtung verhindert wird, die auftritt, wenn nasse Böden mit schweren Erntemaschinen im Herbst befahren werden (Alakukku & Elonen 1995).

Der Faseranteil der Hanfstängel aus dem Winteranbau weist große Spannweiten auf und liegt zwischen 17 und 48 %. Dieses Ergebnis deckt sich mit dem von Scheer-Triebel & Léon (2000), die Fasergehalte zwischen 14,8 bis 41,7 % beschreiben. Die hohen Schwankungen können auch durch Schäbenverluste über den Winter entstehen, da die Hanfstängel überrötet sind. Innerhalb des Stängels entsteht durch die Frosteinwirkung eine hohe Spannung, da die äußerste Schicht des Stängels zuerst gefriert, die eine Ablösung der Fasern zur Folge hat. Dadurch gehen auch Schäbenanteile verloren, welches zu einer Überschätzung des Fasergehaltes führen kann. Pasila (2000) geht von maschinellen Ernteverlusten im Frühjahr von bis zu 40 % beim Ballenpressen aus, wobei die Verluste hauptsächlich Schäben sind. Müssig und Martens (2003) beschreiben jedoch auch für die konventionelle Ernte im Herbst einen Anstieg des Faserbündelanteils im Erntegut aufgrund von Schäbenverlusten durch zunehmenden Röstgrad und intensiven Beerntungsverfahren. Während Mastel *et al.* (1998) Ernteverluste zwischen 20 und 35 % verzeichneten, geben Berendonk *et al.* (2006) bei intensiver Röste mit dreimaligem Wenden bis zu 45 % an.

Im Sommeranbau 2014 führten die verschiedenen Sorten möglicherweise zu unterschiedlichen Fasergehalten, die am Standort Lärz geringer ausfielen. Auch Léon *et al.* (2004) und Haverkamp (2014) beschreiben höhere Fasergehalte der Sorte Fedora gegenüber der Sorte Futura, die auch im Sommeranbau dieses Versuches angebaut wurden, wohingegen die Fasergehalte der beiden Sorten in Versuchen von Röhricht und Schulz (2000) je nach Standort unterschiedlich hoch ausfielen. Westerhuis *et al.* (2009b) gehen davon aus, dass der Umwelteffekt auf den sortenspezifischen Fasergehalt eher klein und vernachlässigbar ist. Die Anbauversuche von Graf *et al.* (2005a) und Röhricht und Schulz (2000) brachten gegenteilige Ergebnisse hervor.

Die Proben im Winteranbau 2013/14 wiesen Faserbündelbreiten zwischen 50 und 70  $\mu\text{m}$  auf. Die von Graupner (2014) beschriebenen Hanffaserbündelbreiten lagen im Mittel bei 58  $\mu\text{m}$  mit einer Standardabweichung von 49  $\mu\text{m}$ . Die in der Literatur beschriebenen Werte werden von Müssig *et al.* (2010) zwischen 3 und 500  $\mu\text{m}$  zusammengefasst. Die ermittelte Zugfestigkeit der Fasern aus dem Winteranbaus dieser Arbeit lag mit Werten zwischen 148 und 402 MPa etwas unter den Literaturangaben (310-1100 MPa (Müssig *et al.* 2010)). Der Zugmodul wurde zwischen 8 289 und 16 538 MPa bestimmt. Graupner (2014) gibt Werte für den Zugmodul von  $5300 \pm 3600$  MPa an, wohingegen Léon und Von Francken-Welz (2003) ebenfalls höhere Werte für den Zugmodul (13 389-20 146 MPa) bei Anbauversuchen in Ostwestfalen ermittelten. Die Bruchdehnung nahm Werte zwischen 2 und 3 % ein. Im Sommeranbau 2014 konnten deutlich höhere Faserbreiten bestimmt werden (68,9 -73,8  $\mu\text{m}$ ). Die Zugfestigkeit betrug am Standort Lärz 498 MPa, am Standort Vermold jedoch nur

207 MPa. Der Zugmodul hatte sehr hohe Werte, 26 757 MPa für den Standort Lärz und 11 994 MPa für den Standort Vermold. Die Bruchdehnung wies Werte zwischen 1,5 und 1,9 % auf. Léon und Von Francken-Welz (2003) erhielten im Sommeranbau auf Versuchsfeldern in Ostwestfalen eine Bruchdehnung zwischen 2,4 und 3,0 %. Eine Erhöhung der Saatstärke führte zu einem signifikanten Anstieg der Bruchdehnung. Im Umkehrschluss kann dies möglicherweise die niedrige Bruchdehnung im Sommeranbau dieser Arbeit aufgrund der niedrigen Aussaatstärke von 25 kg/ha erklären. Im Winteranbau 2013/14 konnte der Zusammenhang zwischen Bruchdehnung und Aussaatstärke, wie von Léon und Von Francken-Welz (2003) festgestellt, nicht eindeutig bestätigt werden. Während an beiden Vermolder Standorten die Bruchdehnung in der hohen Aussaatstärke höher war, brachten die Fasern am Standort Lärz in der niedrigen Aussaatstärke eine signifikant höhere Bruchdehnung hervor.

Im Einfrierversuch wurden Faserbreiten zwischen 55,3 und 66  $\mu\text{m}$  bestimmt, die durch die Frostbehandlung signifikant gegenüber der Ausgangsprobe abnehmen. Die Bruchdehnung verringerte sich bis auf die Probe mit einer Woche Dauerfrost ebenfalls signifikant. Wahrscheinlich reichte hier ein einziges Frostereignis nicht aus, um Veränderungen hervorzurufen. Die Werte aller Proben lagen zwischen 2 und 3 %. Die Zugfestigkeit und der Zugmodul verringerten sich durch die Frosteinwirkung bei allen Proben signifikant gegenüber der Ausgangsprobe. Die Qualitätsparameter der Hanfstängel, die eine Woche lang den Frost-Tauzyklen ausgesetzt wurde, zeigen im Einfrierversuch die stärksten Abnahmen gegenüber der Ausgangsprobe. In den Versuchen zur „Dry-line-Methode“ von Pasila (2000) wurden die Hanfstängel über den Winter in einer Art „feucht-kalt-trocken-Kette“ konserviert. Über das fast tägliche Auftauen und Einfrieren im Frühjahr wurden die Faserzellen voneinander und vom Holzteil gelöst, wodurch sich ebenfalls die mechanischen Parameter verringerten. Abot *et al.* (2013) beschreiben eine Verringerung des Zugmoduls und eine Erhöhung der Bruchdehnung durch die Röste gegenüber frischen Stängelproben. Durch die hohe Streuung der Werte konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden. Zwar brachten die Hanfpflanzen unter Wasserstress weniger Ertrag hervor, jedoch wiesen die mechanischen Eigenschaften ein höheres Zugmodul und höhere Bruchdehnungen auf. Mit Blick auf den Klimawandel hätte ein möglicher Wasserstress einen positiven Effekt auf die Steifigkeit der Fasern.

Hanffasern aus dem Sommeranbau besitzen gegenüber anderen Faserpflanzen, wie z.B. Flachs und Kenaf, eine geringere Zugfestigkeit und einen geringeren Zugmodul, wohingegen eine höhere Bruchdehnung vorhanden ist (Graupner 2014). In der Anwendung beim Spritzgussverfahren müssen die Hanffasern aus dem Sommeranbau durch die Beimischung von weiteren Fasern (z.B. Flachs oder Kenaf) verstärkt werden.

Die schwankende Qualität der Hanffasern bedingt immer noch eine Begrenzung von naturfaserverstärkten Kunststoffen auf mechanisch gering beanspruchte Bauteile (Cescutti &

Müssig 2005). Nach Harig und Müssig (1999) liegen die Voraussetzungen für eine industrielle Anwendung von Faserhanf in der Bereitstellung von reproduzierbaren Faserqualitäten über ein Qualitätsmanagement entlang der Wertschöpfungskette (Anbaubedingungen, Erntezeitpunkt, Röste, Aufbereitung) und in der objektiven Ermittlung von exakten Fasereigenschaften. Für den Einsatz in Naturfaserverbundwerkstoffen spielen neben den morphologischen Eigenschaften (Feinheit, Länge) und mechanischen Werten (Festigkeit), die für die Verarbeitung wichtig sind, auch die Farbe und die chemische Zusammensetzung (Geruch, Staubabscheidungen) der Fasern eine bedeutende Rolle. Diese kommen vor allem in sichtbaren Designanwendungen (z.B. Innenraumanwendungen) zum Tragen (Cescutti & Müssig 2005).

Seitens der Faserzulieferer können durch Vorgaben an die Landwirte Qualitätsschwankungen vermieden werden. Konstante Größen sind darin die Festlegung der Sorte, des Standortes, Düngung und Aussaatmenge. Beeinflussbare Größen liegen im Erntezeitpunkt, in der Erntetechnik, die im Sommeranbau aufgrund der grünen Stängel aufwendig ist und in der Röstdauer. Im Winteranbau sind der Erntezeitpunkt und die Röste bereits „standardisiert“. Durch die lange Standzeit bis zum Absterben der Pflanzen befinden sich diese relativ einheitlich im Wachstumsstadium der Samenreife (Anhang 74). Die Standröste und die Frostwirkung über den Winter überröstet die Fasern (Anhang 75) und bereitet den Landwirten eine einfache Ernte des getrockneten Hanfstrohs ohne aufwendige Erntetechnik (Anhang 76 + 76). Die Reproduzierbarkeit der Faserqualität im Winteranbau muss anhand langjähriger Anbauversuche geklärt werden. Damit bleibt als nicht beeinflussbare Größe, wie bei allen landwirtschaftlichen Kulturen, das Klima.



## 13 Fazit

Im Fazit werden die eingangs in der Zielsetzung aufgestellten Arbeitshypothesen verifiziert bzw. falsifiziert und die wichtigsten Punkte der Diskussion zusammengefasst:

### **Hypothese I: Standort (Klima, Boden und Nährstoffe)**

Im Rahmen dieser Arbeit konnte festgestellt werden, dass der Wasser- und Wärmebedarf der Hanfpflanzen im Winteranbau geringer als im Sommeranbau war. Das gleiche gilt für die Düngemengen bzw. den Nährstoffbedarf, wo sich eine Düngemenge von 60-80 kg N/ha als ausreichend erwies, gegenüber 120 kg N/ha für den Sommeranbau. Beides liegt in der kürzeren Wachstumszeit im Winteranbau begründet, bei dem den Hanfpflanzen zwischen 45 und 60 Tagen zur Verfügung stehen. Im Sommeranbau verbleiben den Hanfpflanzen dagegen 100-120 Tage Wachstumszeit bis zur Ernte. Daraus resultieren für den Winteranbau signifikant geringere Pflanzenhöhen und Stängeldurchmesser, die geringere Erntemengen hervorbringen. Damit kann die Arbeitshypothese I in Betracht auf die Parameter Klima und Nährstoffe verifiziert werden, da die Ansprüche des Hanfes im Winteranbau geringer ausfielen. Die Bodenansprüche des Hanfes im Winteranbau unterschieden sich dagegen nicht von denen des Sommeranbaus. In dieser Arbeit eigneten sich ein Braunerde-Regosol aus Lehmsand, sowie ein Plaggenesch-Gley aus Lehmsand mit guter Wasseranbindung und Nährstoffversorgung sowie pH-Werten zwischen 5,5 und 7,5 gut für den Hanfanbau.

### **Hypothese II: Aussaatstärke**

Die durchgeführten Feldversuche von 2013-14 führten zu dem Ergebnis, dass für den Hanf im Winteranbau eine Aussaatstärke von 25 kg/ha ausreichend ist, um gute Faserqualitäten zu erzielen. Die Verdopplung der Saatstärke brachte im Trend keine Mehrerträge hervor, so dass die niedrige Aussaatstärke empfohlen werden kann, um Saatgutkosten einzusparen. Im Sommeranbau 2014 ergab die Saatstärke von 25 kg/ha zwar sehr hohe Felderträge, jedoch mit Stängeldurchmesser von über 10 mm. Diese erschweren eine technische Aufbereitung. Daher sollte für die Fasergewinnung im Sommeranbau in Deutschland, die in der Literatur empfohlene Saatmenge zwischen 40 und 50 kg/ha nicht unterschritten werden. Die Hypothese II kann falsifiziert werden, da für die Hanffasernutzung im Winter- und Sommeranbau nicht dieselbe Aussaatstärke empfohlen werden kann.

### **Hypothese III: Sickerwasseraustrag und Nährstoffgehalte**

Das Lysimeterexperiment lieferte erstmalig Erkenntnisse zu dem Sickerwasserverhalten unter Hanf, welches bisher in der Literatur nicht beschrieben wurde. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass ein aufeinander folgender Anbau von Hanf im Winter- und Sommeranbau in der Praxis nicht üblich ist, sondern in die Fruchtfolgerotation eingegliedert werden sollte. Diese Aneinanderreihung des Anbaus wurde gewählt, um kurzfristig einen Einfluss des Hanfes auf die Sickerwassermenge zu erhalten.

Bezüglich der Sickerwassermenge kann die Arbeitshypothese III bestätigt werden. Durch den Anbau von Hanf wurde die Sickerwassermenge reduziert, wodurch sich auch die Gefahr eines Nährstoffaustrages in das Grundwasser verringert. Über die Höhe der Nährstoffkonzentrationen können aufgrund des kurzen Versuchszeitraumes und möglicher Vorfruchteinflüsse keine gesicherten Aussagen getroffen werden.

#### **Hypothese IV: Frostwirkung auf die Faserqualität**

Im Winteranbau 2013/14 und im Einfrierversuch konnte aufgezeigt werden, dass die Faserqualität durch die Frosteinwirkung beeinflusst wurde, womit die Arbeitshypothese IV verifiziert werden kann. Während die Bruchdehnung durch die Frosteinwirkung zunahm, konnte in der Zugfestigkeit, dem Zugmodul und der Faserbreite eine Abnahme festgestellt werden. Dabei zeigen die Proben, die über eine Woche täglich aufgetaut und eingefroren wurden, den stärksten Effekt. Die Werte der bestimmten Parameter aus Winteranbau und Einfrierversuch liegen im Rahmen der in der Literatur angegebenen Werte (Müssig *et al.* 2010). Die Spannweiten der einzelnen Parameter, die die Faserqualität beschreiben, sind dabei sehr groß und je nach Verwendungszweck (textile Anwendung, Verwendung als Faserverbundwerkstoff usw.) werden unterschiedliche Anforderungen an die Faserqualität seitens der Verarbeiter gestellt (Mediavilla *et al.* 2001). Die Fasern aus dem Winteranbau weisen in der Weiterverarbeitung bessere Eigenschaften als die Fasern aus dem Sommeranbau auf, mit höheren Werten in der Zugfestigkeit und dem Zugmodul. Im Gegensatz zu den Fasern aus dem Sommeranbau konnten die Fasern des Winteranbaus ohne Beimischung von weiteren Naturfasern, wie Kenaf oder Flachs, im Verbundwerkstoff verwendet werden. Auch in der Literatur beschreiben Léon & Von Francken-Welz (2000) und Pasila (2004), dass die schwächsten Fasern die stärksten Verbundwerkstoffe hervorbrachten. Aus diesem Grund ist es wichtig, nicht nur die Qualität der Fasern als Rohmaterial zu betrachten, sondern die Qualität des Endproduktes zu bewerten. Die Industrie fordert von den Landwirten eine reproduzierbare Qualität der Fasern, die durch eine Standardisierung der Erntemethoden und Röste zu erreichen wäre (Ribeiro 2015). Da der Erntezeitpunkt und die Röstdauer einen entscheidenden Einfluss auf die Faserqualität haben, bringt der Winteranbau eine Vereinheitlichung dieser Merkmale mit sich. Alle Pflanzen gehen bis zum Absterben im Herbst in die Samenbildung über und überrösten während der Wintermonate. Dadurch erhält man eine gleichmäßige Ausreifung der Faserzellen sowie eine einheitliche Röste.

Aus den Ergebnissen des Praxisversuchs kann folgende Empfehlung für den Winteranbau von Hanf gegeben werden:

<b>Boden</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• leichte Böden (z.B. Braunerde-Regosol aus Lehmsand, Plaggenesch-Gley aus Lehmsand)</li><li>• C<sub>org</sub>-Gehalt &gt; 1%</li><li>• pH Werte zwischen 5,5 und 7,5</li></ul>
<b>Klima</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Niederschlagssumme von 150-200 mm, davon 50-70 mm im August oder Böden mit Grundwasseranschluss</li><li>• Wärmesumme im Juli und August ausreichend</li></ul>
<b>Aussaatzeit</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mitte bis Ende Juli nach frühräumenden Kulturen (z.B. Wintergerste, Wickroggen)</li></ul>
<b>Düngung</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 60 kg N/ha</li><li>• Wirtschaftsdünger sind gut geeignet</li></ul>
<b>Sorte</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• EU-zertifizierte Sorten</li><li>• Monözische Sorten (z.B. Fedora 17)</li></ul>
<b>Aussaatstärke</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 25 kg/ha</li></ul>

**Abbildung 13-1: Anbauempfehlung für Hanf über den Winter**

Die Anbauempfehlung gilt jedoch unter Vorbehalt, da in dieser Arbeit nur zwei Standorte mit drei verschiedenen Bodentypen untersucht wurden. Des Weiteren kam nur eine Sorte (Fedora 17) zum Einsatz, die in nur zwei unterschiedlichen Aussaatstärken angebaut wurde.

Weitere Forschung ist hier notwendig.

## 14 Forschungsbedarf und Ausblick

Hanf ist ein sehr variabel einsetzbarer, nachwachsender Rohstoff mit einem großen Potenzial, wodurch das aktuelle wirtschaftliche Interesse begründet ist. Jedoch ist Hanf nach mehr als 20 Jahren der Wiederezulassung in Europa immer noch ein Nischenprodukt (Amaducci *et al.* 2015). Die Nachfrage von europäischen Automobilherstellern nach Naturfasern ist vorhanden und wächst weiter an. Wichtig für den europäischen Markt wäre es, die Nachfrage auch aus dem EU-Anbau decken zu können. Gegenüber synthetischen Fasern bieten Naturfasern viele ökologische Vorteile, allerdings müssen die Qualitätsparameter besser standardisiert werden.

Da der Winteranbau von Hanf ein absolutes Novum darstellt, gibt es viel Forschungsbedarf zu unterschiedlichen Themenbereichen:

- **Anbauversuche und Züchtung**

Die bisher erzielten Erkenntnisse mit Hanf im Winteranbau sind noch zu gering, um eine praxisreife Anbauempfehlung geben zu können. Dazu ist weitere Forschung nötig. Für eine erste Einschätzung zur Überprüfung der Rentabilität und der Faserqualität für eine industrielle Nutzung war der Praxisversuch jedoch sehr gut geeignet. Für weitere wissenschaftliche Untersuchungen müssen jedoch Parzellenversuche mit vergleichbaren Anbaubedingungen die Ergebnisse des Praxisversuches fundieren und spezifizieren. Dazu müssten für den Winteranbau angepasste Aussaatstärkenversuche in feineren Abstufungen als die in dieser Arbeit verwendeten 25 und 50 kg/ha durchgeführt werden, um die Erträge des Winteranbaus noch zu steigern. Der Wachstumsverlauf sollte unter Zuhilfenahme des von Mediavilla *et al.* (1998b) entwickelten Boniturcodes detaillierter erfasst werden, um mögliche Unterschiede zum Sommeranbau herausarbeiten zu können. Des Weiteren sollten Versuche mit spätreifen Sorten durchgeführt werden, wodurch die Wachstumszeit verlängert und der Stängelерtrag gesteigert werden kann. Die von 1995 bis 2015 gestiegene Zahl der registrierten Hanfzüchter in Europa bezeugt das steigende Interesse an der Feldfrucht Hanf (Salentijn *et al.* 2015). Eine eigenständige Züchtung von Sorten für den Winteranbau ist für die Etablierung dieser Anbauform unabdingbar und muss in den Fokus der Hanfzüchter gebracht werden.

- **Lysimeterversuche**

Der Einfluss des Hanfanbaus über den Winter auf den Austrag von Nährstoffen über das Sickerwasser, konnte im Lysimeterexperiment nicht eindeutig geklärt werden. Dazu war der Beobachtungszeitraum zu kurz. Die durchschnittliche Verweilzeit des Sickerwassers beträgt in der Dränzone ca. 2,8 Jahre. Eulenstein & Wurbs (1994) und Richter *et al.* (1994) beschreiben Nährstoffausträge durch eine Veränderung in der Fruchtfolge erst nach mehreren Jahren. Zudem wurde der Hanf mehrfach im Winter- und Sommeranbau hintereinander angebaut, welches nicht praxisüblich ist. Somit sind mehrjährige Versuche mit Fruchtfolgen mit und ohne Hanf als Winterzwischenfrucht vonnöten, um mögliche

Nährstoffverluste mit dem Sickerwasser quantifizieren zu können. Dabei können die Nährstoffverluste keiner einzelnen Kultur zugerechnet werden, sondern müssen immer im Kontext auf die gesamte Fruchtfolgerotation betrachtet werden (Sieling *et al.* 1996).

- **Faserqualität**

Die Fasern aus dem Winteranbau dieser Arbeit weisen durch die Frosteinwirkung eine geringere Zugfestigkeit und niedrigeren Zugmodul, jedoch eine erhöhte Bruchdehnung auf. Dieses konnte im Einfrierversuch für die Parameter Zugfestigkeit und Zugmodul bestätigt werden. Im Spritzgussverfahren der Firma Polyvlies konnten die Fasern aus dem Winteranbau ohne Beimischung von anderen Fasermaterialien (z.B. Flachs und Kenaf) verwendet werden, die bei Fasern aus dem Sommeranbau notwendig ist. Der singuläre Einsatz der Fasern aus dem Winteranbau ist jedoch nur unter Vorbehalt gleichbleibender Faserqualitäten möglich. Aus diesem Grund sind mehrjährige Versuchsreihen im Spritzgussverfahren mit Fasern aus dem Winteranbau vonnöten. Des Weiteren müssten die Fasern aus dem Winteranbau auch in anderen Faserverbundstoffen auf ihre Eignung getestet werden. Die Fasern aus dem Winteranbau weisen zudem geringere Faserbreiten auf, wodurch eine textile Verwendung möglich wäre, welches getestet werden müsste.

Der Einfluss des Frostes und die Veränderung der Qualitätsparameter müssten zudem noch detaillierter anhand von Feldversuchen bestimmt werden. Dazu müssten während des Anbaus in kurzen zeitlichen Abständen Stängelproben aus dem Feldbestand entnommen und bezüglich der Faserqualität analysiert werden.

Generell sind die Spannweiten der einzelnen Parameter, die die Faserqualität beschreiben, sehr groß und je nach Verwendungszweck definiert sich die Faserqualität anders. Daher müssten von Seiten der Industrie genauere Vorgaben gemacht werden.

- **Mikroskopische Verfahren**

Mikroskopische Verfahren wie die Durchlicht-, Fluoreszenz- oder Rasterelektronen-Mikroskopie geben ergänzende Informationen zu den mechanischen Eigenschaften der Faserzellen. Die aufgrund der zu zeitintensiven Probenvorbereitung nicht weiter verfolgte Methode der Mikroskopie, sollte für das Verständnis von Abreifeverhalten und Roste der Faserzellen aus dem Winteranbau weiter verfolgt werden. Der Nährstoffverbleib könnte mittels Färbemethoden nachgewiesen werden, da im Winteranbau in den Stängeln höhere Nährstoffgehalte bestimmt wurden als im Sommeranbau. Möglicherweise führt dies zu besseren mechanischen Eigenschaften der Fasern. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Faseroberflächen aus dem Winteranbau könnten Aufschluss über die Oberflächenstruktur geben, die für die Bindung zwischen Kunststoff und Naturfasern Verbundwerkstoffen eine wichtige Rolle spielt.

- **Ökologische Vorteile von Hanf im Winteranbau**

Neben den in dieser Arbeit beschriebenen Vorteilen des Hanfanbaus über den Winter, wie z.B. Erosionsschutz, Deckung für Wildtiere, Auflockerung der Fruchtfolge, Unkrautunterdrückung, zusätzliche Wertschöpfung für die Landwirte, könnte diese Anbauform als Möglichkeit zur Verringerung von Feldmausbeständen eingesetzt werden, die insbesondere auf den großen Feldschlägen in Thüringen sehr hoch sind. Beobachtungen bei Anbauversuchen in den neuen Bundesländern zeigten, dass Feldmäuse den Geruch der Hanfpflanzen nicht mögen und daher Hanfbestände als Lebensraum meiden. Allein für 2007 wurde der finanzielle Verlust durch Mäusebefall mit ca. 140 Millionen Euro für Deutschland angegeben. Es müsste daher untersucht werden, ob sich der Feldmausbestand durch den Anbau von Hanf über den Winter verringern ließe. Wäre dies möglich, würde der Hanf eine umweltschonende Alternative zum Einsatz von Giftködern bieten und gleichzeitig den hohen Verlusten durch Ernteaufwände entgegenwirken.

- **Aufnahme in das EU-Greeningprogramm**

Nach der erfolgreichen Gesetzesänderung, die nun den Anbau von Hanf über den Winter ermöglicht, ist es ein großes Anliegen der Landwirte, dass der Hanf in das EU-Greeningprogramm aufgenommen wird. Damit würde der Anbau von Hanf über den Winter nicht im Konflikt mit der Erfüllung der Greening-Auflagen stehen, in denen Betriebe über 15 ha, 5 % der Ackerflächen als ökologische Vorrangfläche ausweisen müssen. Zudem würde der monetäre Gewinn mit dem Winteranbau des Hanfes über den Erhalt der Greening-Prämie höher. In Nordrhein-Westfalen wird der Hanf im Winteranbau bereits als Agrarumweltmaßnahme gefördert (LWK NRW 2018).

Abschließend lässt sich folgern, dass die vorliegende Arbeit mit dem Thema „Der Anbau von Faserhanf (*Cannabis sativa* L.) als Winterzwischenfrucht“ vielseitige Vorteile dieser Anbauform belegen konnte und die erzielten Faserqualitäten für einen verstärkten Einsatz in der Automobilindustrie oder sogar in der textilen Verwendung sprechen. Zudem sollte auch eine ganzpflanzliche Verwertung (z.B. Schäben als Tiereinstreu) oder eine Koppelnutzung der Fasern mit Blüten oder Samen in Betracht gezogen werden. Diese könnte durch eine Ernte der Pflanzenspitzen im stehenden Bestand im Herbst erfolgen, worauf die restlichen Pflanzen über den Winter verbleiben und im Frühjahr geerntet werden. Die klimatischen Verhältnisse in Deutschland eignen sich gut für den Anbau von Hanf über den Winter, da die regenreiche Zeit des Jahres mit der Aussaat des Hanfes im Juli zusammenfällt. In Betracht auf mögliche Folgen des Klimawandels, ist der Winterbau von Hanf nicht stärker risikobehaftet als der Anbau von anderen landwirtschaftlichen Kulturpflanzen.

Der Anbau von Hanf als Winterzwischenfrucht sollte aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse auf jeden Fall weiter verfolgt werden....



## 15 Literaturverzeichnis

- Abdollahi, L., Schjøning, P., Elmholt, S., Munkholm, L.J. (2014): The effects of organic matter application and intensive tillage and traffic on soil structure formation and stability. *Soil Tillage Research* 136, 28-37.
- Abot, A., Bonnafous, C., Touchard, F., Thibault, F., Chocinski-Arnault, L., Lemoine, R., Dédaldéchamp, F. (2013): Effects of cultural conditions on the hemp (*Cannabis sativa*) phloem fibres: Biological development and mechanical properties. *Journal of Composite Materials*, 47(8), 1067-1077.
- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*, 5. Aufl. (KA5). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.) - Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart.
- Ahl, C., Carminati, A., Gernandt, P., Jörgensen, R.G. (2016): *Aspekte und Grundlagen der Bodenkunde*. 40. Auflage. Göttingen/Witzenhausen. Eigenverlag.
- Alfaro, M.A., Jarvis, S.C., Gregory, P.J. (2004): Factors affecting potassium leaching in different soils. *Soil Use and Management* 20, 182-189.
- Alukukku, L., Elonen, P. (1995): Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on crop and nitrogen uptake of annual crops. *Soil & Tillage Research* 36, 141-152.
- Amaducci, S., Errani, M., Venturi, G. (2002): Plant population effect on fibre hemp morphology and production. *Journal of Industrial Hemp* 7(2), 33-60.
- Amaducci, S., Amaducci, M.T., Benati, R., Venturi, G. (2000): Crop yield and quality parameters of four annual fibre crops (hemp, kenaf, maize and sorghum) in the North of Italy. *Industrial Crops and Products* 11, 179-186.
- Amaducci, S., Pelatti, F., Bonatti, P.M. (2005): Fibre development in hemp (*Cannabis sativa* L.) as affected by agrotechnique: preliminary results of a microscopic study. *Journal of Industrial Hemp* 10, 31-48.
- Amaducci, S., Scordia, D., Liu, F.H., Zhang, Q., Guo, H., Testa, G., Cosentino, S.L. (2015): Key cultivation techniques for hemp in Europe and China. *Industrial Crops and Products* 68, 2-16.
- Amaducci, S., Zatta, A., Pelatti, F., Venturi, G. (2008a): Influence of agronomic factors on yield and quality of hemp (*Cannabis sativa* L.) fibre and implication for an innovative production system. *Field Crops Research* 107, 161-169.

- Amaducci, S., Zatta, A., Raffanini, M., Venturi, G. (2008b): Characterization of hemp (*Cannabis sativa* L.) roots under different growing conditions. *Plant and Soil* 313: 227-235.
- Amlinger, F., Bäck, E., Buchgraber, K., Dachler, M., Dersch, G., Egger, R., Eigner, H., Froschauer, J., Fenz, R., Galler, J., Gruber, L., Hofmair, W., Hölz, F.X., Holzner, H., Hösch, J., Humer, J., Hütter, M., Juritsch, G., Klaghofer, E., Kuderna, M., Mayer, K., Priller, H., Pötsch, E., Rech, T., Reheis, W., Schwarzl, B., Springer, J., Spiegel, H., Steinwider, A., Tomek, H., Traudtner, F., Winkovitsch, C. (2006): Richtlinien für die sachgerechte Düngung. 6. Auflage. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.), Wien.
- Andersson, H., Bergström, L., Djodjic, F., Ulén, B., Kirchmann, H. (2013): Topsoil and subsoil properties influence phosphorus leaching from four agricultural soils. *Journal of Environmental Quality* 42, 455-463.
- Andersson, S., Simonsson, M., Mattsson, L., Edwards, A. C., Öborn, I. (2007): Response of soil exchangeable and crop potassium concentrations to variable fertilizer and cropping regimes in long-term field experiments on different soil types. *Soil Use and Management* 23, 10-19.
- Anken, T. (2003): Pflanzenentwicklung, Stickstoffdynamik und Nitratauswaschung gepflügter und direktgesäter Parzellen. Dissertation. Eidgenössische technische Hochschule Zürich.
- Arden, A. (2018): Neue Richtwerte für Phosphor in den Gehaltsklassen A bis E. topagraronline, Münster. Online: <https://www.topagrar.com/news/Schwein-News-Schwein-Neue-Richtwerte-fuer-Phosphor-in-den-Gehaltsklassen-A-bis-E-9145692.html> (Abrufdatum. 12.02.2018).
- Aubin, M.P., Seguin, P., Vanasse, A., Tremblay, G.F., Mustafa, A.F., Charron, J.B. (2015): Industrial hemp response to nitrogen, phosphorus and potassium fertilization. *Crop, Forage and Turfgrass Management* 1, 1-10.
- Averink, J. (2015): Global water footprint of industrial hemp textile. Dissertation. Water Engineering and Management, University of Twente, Enschede.
- Bach, M., Frede, H.-G. (1998): Agricultural nitrogen, phosphorus and potassium balances in Germany – Methodology and trends 1970 to 1995. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 161, 385-393.
- Baltas, E. (2007): Spatial distribution of climatic indices in northern Greece. *Meteorological Applications* 14, 69-78.



- Bandoc, G. (2012): Estimation of the annual and interannual variation of potential evaporation. In: Remote Sensing and Modelling, Irmak, A. (Hrsg.). InTech. Online: <http://www.intechopen.com/books/evapotranspiration-remote-sensing-and-modeling/estimation-of-the-annual-and-interannual-variation-of-potential-evapotranspiration>. (Abrufdatum 08.12.2017).
- Barth, N., Degering, D., Haase, D., Haverkorn, U. Heilmann, H., Klose, R., Knappe, S., Kurzer, H.-J., Machulla, G., Mattusch, J., Neubert, K.H., Pälchen, W., Raben, G.H., Rank, G., Schlenker, S., Schneider, B., Suntheim L., Wennricht, R. (2001): Bodenmonitoring in Sachsen, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.), Dresden.
- Bassetti, P., Mediavilla, V., Spiess, E., Amman, H., Strasser, H., Moismann, E. (1998): Hanfanbau in der Schweiz – Geschichte, aktuelle Situation, Sorten, Anbau- und Erntetechnik, wirtschaftlicher Aspekt und Perspektiven. FAT-Berichte Nr. 516. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (Hrsg.).
- Beare, M.H., Gregorich, E.G., St.-Georges, P. (2009): Compaction effects of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O production during drying and rewetting of soil. *Soil Biology & Biochemistry* 41(3), 611-621.
- Behr, M., Legay, S., Žižková, E., Motyka, V., Dobrev, P. I., Hausman, J.-F., Lutts, S., Guerriero, G. (2016): Studying secondary growth and bast fibre development: The hemp hypocotyl peeks behind the wall. *Frontiers in Plant Science* 7, 1733.
- Berendonk, C., Wehren, W., Berntsen, M., Neswadba, R., Reijngoudt, E. (2006): Hanfanbau auf Haus Riswick. Erfahrungen aus dem Anbau 2005 und 2006. Landwirtschaftskammer NRW. Online: <http://www.landwirtschaftskammer.de/riswick/pdf/hanfanbau-riswick-2005-2006.pdf> (Abrufdatum 20.06.2018).
- Bickel-Sandkötter, S. (2001): Nutzpflanzen und ihre Inhaltsstoffe. 1. Auflage. Quelle & Meyer Verlag, Wiebelsheim.
- Bismarck, A., Aranberri-Askargorta, I., Springer, J., Lampke, T., Wielage, B., Stamboulis, A., Shenderovich, I., Limbach, H.-H. (2002): Surface characterization of flax, hemp and cellulose fibers; surface properties and the water uptake behavior. *Polymer Composites* 23(5), 872-894.
- Block, C. (1998): Berichte und Versuchsergebnisse Hanf. Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe (Hrsg.).

- Blume, H.-P., Brümmer, G.W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.M. (2010): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag.
- Bócsa, I., Karus, M. (1998): The cultivation of hemp: botany, varieties, cultivation and harvesting. Hemptech, Sebastopol, USA.
- Bócsa, I., Karus, M., Lohmeyer, D. (2000): Der Hanfanbau: Botanik, Sorten, Anbau und Ernte, Märkte und Produktlinien, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster.
- Borthwick, H. A., Scully, N. J. (1954): Photoperiodic responses of hemp. *Botanical Gazette* 116, 14-29.
- Brod, H.-G. (2013): Entwicklung des Mineraldüngerverbrauchs in Deutschland. In: Kühn, J., Thaer heute, Fördergesellschaft Albrecht Daniel Thaer e.V., Bd. 9, 79-96.
- Bu, X.L., Ding, J.M., Wang, L.M., Yu, X.N., Huang, W., Ruan, H.H. (2011): Biodegradation and chemical characteristics of hot-water extractable organic matter from soils under four different vegetation types in the Wuyi Mountains, southeastern China. *European Journal of Soil Biology* 147(2), 102-107.
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2017): Sortenliste für den Hanfanbau. Online: [https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Landwirtschaft/Nutzhanf/2017\\_Sortenliste.pdf?jsessionid=1E46A58BF0DC71A85937FA9988426E28.2\\_cid335?\\_\\_ob=publicationFile&v=5](https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Landwirtschaft/Nutzhanf/2017_Sortenliste.pdf?jsessionid=1E46A58BF0DC71A85937FA9988426E28.2_cid335?__ob=publicationFile&v=5) (Abrufdatum 16.07.2018).
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2017): Düngung. Online: [https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Pflanzenbau/Ackerbau/\\_Texte/Duengung.html](https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Pflanzenbau/Ackerbau/_Texte/Duengung.html) (Abrufdatum 09.03.2018).
- Cameron, K.C., Scotter, D.R. (1986): Nitrate leaching losses from temperate agricultural systems, pp. 251-281. In: Nitrogen cycling in temperate agricultural systems, Vol. 2, Bacon, P.E., Evans, J., Storrier, A.C., Tayler, A.C. (Hrsg.). Australian Society of Soil Science, Riverina.
- Carey, P.L., Curtin, D., Scott, C. L. (2011): An improved procedure for routine determination of reserve-K in pastoral soils. *Plant and Soil* 341, 461-472.
- Cescutti, G., Müssig, J. (2005): Naturfasern: Industrielles Qualitätsmanagement. *Kunststoffe* 1, 97-100. Carl Hanser Verlag, München.

- Chantigny, M.H., Angers, D.A., Prévost, D., Simard, R.R., Chalifour, F.-P. (1999): Dynamics of soluble organic C and C mineralization in cultivated soils with varying N fertilizations. *Soil Biology and Biochemistry* 31, 543-550.
- Chantigny, M. H. (2003): Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices. *Geoderma* 113, 357-380.
- Cherney, J.H., Small, E. (2016): Industrial hemp in North America: Production, politics and potential. *Agronomy* 6(4), 58.
- Chernova, T.E., Mikshina, P.V., Salnikov, V.V., Ibragimova, N.N., Sautkina, O.V., Gorshkova, T.A. (2018): Development of distinct cell wall layers both in primary and secondary phloem fibers of hemp (*Cannabis sativa* L.). *Industrial Crops and Products* 117, 97-109.
- Christen, O., Schulze, B. (1997): Produktionstechnik der Hanferzeugung I – Beitrag des Pflanzenbaus. In: Hanf, C.-H. 1997. Anbau, Ernte und Aufbereitung sowie Verwendung von Hanf. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 7, Teil 2, Landwirtschaftsverlag GmbH Münster, S. 179-250.
- Clarke, R.C. (1997): Hanf – Botanik, Anbau, Vermehrung und Züchtung. AT Verlag, Aarau, Schweiz.
- Cochran, M. J., Windham, T. E., Moore, B. (2000): Feasibility of industrial hemp production in Arkansas. University of Arkansas. Online: <http://www.votehemp.com/PDF/Hemp-Feasability-UofA.pdf> (Abrufdatum: 18.05.2018).
- Cosentino, S.L., Testa, G., Scordia, D., Copani, V. (2012): Sowing time and prediction of flowering of different hemp (*Cannabis sativa* L.) genotypes in Southern Europe. *Industrial Crop Products* 37, 20-33.
- Cosentino, S.L., Riggi, E., Testa, G., Scordia, D., Copani, V. (2013): Evaluation of European developed fibre hemp genotypes (*Cannabis sativa* L.) in semi-arid Mediterranean environment. *Industrial Crops and Products* 50, 312-324.
- Crowley, J.G. (2001): The performance of *Cannabis sativa* (hemp) as a fibre source for medium density fibre boards (MDF). Crops Research Centre, Oak Park, Carlow. Online: [https://www.teagasc.ie/media/website/crops/crops/Hemp\\_for\\_MDF\\_production.pdf](https://www.teagasc.ie/media/website/crops/crops/Hemp_for_MDF_production.pdf) (Abrufdatum: 26.02.2018).
- Curtin, D., Wright, C.E., Beare, M.H., McCallum, F.M. (2006): Hot water-extractable nitrogen as an indicator of soil nitrogen availability. *Soil Science Society of America Journal* 70, 1512-1521.

- Danielewicz, D., Surma-Ślusarska, B. (2018): Properties of fibre characterisation of bleached hemp, birch and pine pulps: a comparison. *Cellulose* 24; 5173-5186.
- Dassannayake, A.R. (1990): Potassium leaching in stony and sandy soils. Masterarbeit. University of Reading Central Library UK.
- Dayo, A.Q., Wang, A., Kiran, S., Wang, J., Qureshi, K., Xu, Y., Zegaoui, A., Derradji, M., Babar, A. A., Liu, W. (2018): Impacts of fiber hemp on mechanical and water uptake properties of polybenzoxazine composites. *Industrial Crops and Products* 111, 277-284.
- Debruck, J., Reichardt, I. (2002): Neue Ergebnisse zur Anbautechnik von Hanf. *UFOP-Schriften* 20, 229-237.
- Delgado, A., Scalenghe, R. (2008): Aspects of phosphorous transfer from soils in Europe. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171, 552-575.
- Del-Ray, R., Serrat, R., Alba, J., Perez, I., Mutje, P. Espinach, F.X. (2017): Effect of sodium hydroxide treatments on the tensile strength and the interphase quality of hemp core fiber-reinforced polypropylene composites. *Polymers* 9(8) 377, 1-15.
- Dempsey, J. M. (1975): Hemp. In: *Fibre Crops*. Gainesville, USA: The University Presses of Florida, 46-89.
- Edwards, A.C., Chambers, P.A., (2002): Quantifying nutrient limiting conditions in temperate river systems. In: Haygarth, P.M., Jarvis, S.C. (Hrsg.), *Agriculture, Hydrology and Water Quality*. CAB International, Wallingford, 477-493.
- Eghball, B., Wienhold, B.J., Gilley, J.E., Eigenberg, R.A. (2002): Mineralization of manure nutrients. *Journal of Soil and Water Conservation* 57(6), 470-473.
- Ehrensing, D.T. (1998): Feasibility of industrial hemp in the United States, Pacific Northwest. Agricultural Experiment Station, Oregon State University. Online: <https://catalog.extension.oregonstate.edu/sb681> (Abrufdatum: 20.03.2018).
- El-Ghany, M.E.A. (2002): Molekulargenetische Diversität einer monözischen und einer diözischen Hanfsorte und Analyse des Fasergehaltes von verschiedenen Hanfformen (*Cannabis sativa* L.). Dissertation. Institut für Pflanzenzüchtung und Pflanzenschutz der Landwirtschaftlichen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- Eulenstein, F., Wurbs, A. (1994): Konzepte und Modellvorhaben zum Grundwasserschutz in den Bundesländern. KTBL-Arbeitspapier 206: Strategien zur Verminderung der Nitratauswaschung in Wasserschutzgebieten, 183-192.

- Fernea, R., Manea, D.L., Tămaș-Gavrea, D.R., Miron, O.I. (2017): Preliminary research on using industrial plant in constructions. *Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development* 17 (1), 203-248.
- Finnan, J., Burke, B. (2013): Nitrogen fertilization to optimize the greenhouse gas balance of hemp crops grown for biomass. *Bioenergy* 5, 701-712.
- Flachowsky, H. (2003): Erstellung einer genetischen Karte an Hanf (*Cannabis sativa* L.) mit molekularen Markern. Dissertation. Institut für Pflanzenzüchtung und Pflanzenschutz der Landwirtschaftlichen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- Fleige H., Grimme, H., Renger, M., Strebel, O. (1983): Zur Erfassung der Nährstoffnachlieferung durch Diffusion im effektiven Wurzelraum. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 38, 381-386.
- Fortenbery, T. R. & Bennett, M. (2001): Is industrial hemp worth further Study in the US? A Survey of the Literature. *Agricultural & Applied Economics*, University of Wisconsin, Staff Paper No. 443.
- Fowler, J., Cohen, L., Jarvis, P. (2006): *Practical statistics for field biology*, Wiley, Chichester.
- Francis, G.S., Trimmer, L. A., Tregurtha, C.S., Williams, P.H., Butler, R. C. (2003): Winter nitrate leaching losses from three land uses in the Pukekohe area of New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 46 (3), 215-224.
- Fuller, W. H., Norman, A. G., Wilsie, C. P. (1946): The retting of hemp I. Field retting of hemp in Iowa. *Research Bulletin. Iowa Agriculture and Home Economics Experiment Station*, 27 (342), 831-891.
- Geisler, G. (1988): *Pflanzenbau – Biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion*. 2. Auflage. Paul Parey Verlag, Berlin und Hamburg.
- Germann, O. (1979): *Zur Bodenfruchtbarkeit*. 10. Auflage. Landwirtschaftliche Beratung Thomasdünge und HK-Kalke, Düsseldorf.
- Gernandt, P. (2007): *Geographie in der Bodenkunde*. Westermann, Braunschweig.
- Ghani, A., Dexter, M., Perrott, K. W. (2003): Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation. *Soil Biology and Biochemistry* 35, 1231-1243.

- Glawion, R., Glaser, R., Sauer, H., Gaede, M., Weiler, M. (2012): *Physische Geographie*, Westermann Braunschweig.
- Godlinks; F. (2005): Abschätzung der Phosphorausträge aus der ungesättigten Bodenzone anhand numerischer Interpretationen von Lysimeterversuchen. Dissertation. Institut für Landnutzung der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock.
- Graf, T., Biertümpfel, A., Rudel, H., Reinhold, G. (2006): Begleitung der Einführung des Praxisanbaus von Hanf in Thüringen, Abschlussbericht. Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt (Hrsg.), Jena.
- Graf, T., Reinhold, G., Biertümpfel, A., Zorn, W. (2005a): Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Faserhanf, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena.
- Graf, T., Rudel, H., Biertümpfel, A., Berthold, L. (2005b): Eine Produktionskette von der Hanfpflanze bis zum Verbundwerkstoff – Praxisbeispiel aus der Region Altenburg. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena.
- Gransee, A., Merbach, W. (2000): Phosphorus dynamics in a long-term P fertilization trial on Luvic Phaeozem at Halle. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163, 353-357.
- Graupner, N. (2014): Analyse und Optimierung der Struktur- und Eigenschaftsbeziehungen von cellulosefaserverstärkten Polylactid-Verbundstoffen. Dissertation. Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften der Technischen Universität Clausthal.
- Gruber, B. (2012): Erstellung von E-Learning Materialien zur Kulturpflanze *Cannabis sativa*, für den Unterricht an landwirtschaftlichen Fachschulen. Bachelorarbeit. Hochschule für Agrar- und Umweltpädagogik Wien.
- Guo, W., Andersen, M.N, Qi, X., Li, P., Li, Z., Fan, X., Zhou, Y. (2017): Effects of reclaimed water irrigation and nitrogen fertilization on chemical properties and microbial community of soil. *Journal of Integrative Agriculture* 16(3), 679-690.
- Gusovius, H.-J. (2002): Stoffwandlungen und Umwelteinflüsse in Verfahrensketten für Faserhanf. Dissertation. Cuvillier Verlag, Göttingen.
- Gusovius, H.-J., Prochnow, A., Hahn, J., Müssig, J. (1999): Faserqualität von Hanf – Der Einfluss von Ernteverfahren und Feldliegezeit. *Landtechnik* 4, 230-231.
- Gusovius, H.-J., Prochnow, A., Hahn, J., Streßmann, U., Ehlert, D. (1998): Feldtrocknung von Faserhanf. *Agrartechnische Forschung* 4, H. 1, 64-69.

- Hadders, G. (1994): Erfarenheter Kring Vårskördat Rörflen, JTI Rapport 191 (in Swedish).  
In: Pasila, A. (2004): Dry-line-method in bast fibre production. Academic Dissertation.  
University of Helsinki.
- Haferkorn, U. (2000): Größen des Wasserhaushaltes verschiedener Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung im klimatischen Grenzraum des Mitteldeutschen Trockengebietes – Ergebnisse der Lysimeterstation Brandis -. Dissertation. Fakultät für Agrarwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen.
- Hahn, J., Gusovius, H.-J., Müssig J. (2000): The influence of harvesting technologies and weather on the fibre characteristics of hemp. European Agency of Agricultural Engineers, Warwick, 00-PH-025, 1-5.
- Hakala, K., Keskitalo, M., Eriksson, C., Pitkänem, T. (2009): Nutrient uptake and biomass accumulation for eleven different crops. *Agriculture and Food Science* 18, 366-387.
- Hamkalo, Z., Bedernichek, T. (2014): Total, cold and hot water extractable organic carbon in soil profile: impact of land-use change. *Zemdirbyste-Agriculture* 101(2), 125-132.
- Haney, A., Kutscheid, B.B. (1975): An ecological study of naturalized hemp (*Cannabis sativa* L.) in east-central Illinois. *American Midland Naturalist* 93, 1-24.
- Hanf, C.-H. (1997): Wissenschaftliche Untersuchungen zum Thema “Anbau, Ernte und Aufbereitung sowie Verwendung von Hanf“. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 7, Teile 1 und 2, Landwirtschaftsverlag GmbH Münster.
- Hanus, H. (1996) Produktionstechnik der Hanferzeugung. Teilgutachten zum Gutachten „Anbau, Ernte und Aufbereitung sowie Verwendung von Hanf“ im Auftrag der Bundesanstalt für nachwachsende Rohstoffe. Kiel.
- Härkäsalmi, T. (2006): Innovaatio hakuisuus runkokuitujen tekstiilituotannossa – konseptoinnilla kohti lyhytkuitujen tuottestamamista. Dissertation, University of Helsinki (in Finnish). Zitiert in: Nykter, M. (2006).
- Haverkamp, M. (2014): Einfluss der agronomischen Maßnahmen, Umwelt und Sorte auf die wertbestimmenden Eigenschaften von Faserhanf (*Cannabis sativa* L.) in Nordrhein-Westfalen. Online-Dissertation Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Online: <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2014/3671/3671.htm> (Abrufdatum 25.05.2018).
- Hege, U., Peretzki, F., Diepolder, M, Capriel, P. (2003): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland. 7. Auflage. Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz (Hrsg.).

- Hein, W., Waschl, H. (2007): Leaching losses in organic and conventional management. 9. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Online: <http://orgprints.org/view/projects/wissenschaftstagung-2007.html> (Abrufdatum: 21.02.2018).
- Heinitz, F., Farack, K. Albert, E. (2013): Strategie zur Verbesserung der P-Effizienz im Pflanzenbau. Heft 9. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.).
- Heinzel, C. (2018): Das Klima an Müritz und Mecklenburgischer Seenplatte. Online: [https://www.muertitz.de/urlaubswetter/klima\\_und\\_wetter\\_mecklenburgische\\_seenplatte](https://www.muertitz.de/urlaubswetter/klima_und_wetter_mecklenburgische_seenplatte) (Abrufdatum 10.06.2018).
- Henningsen, D., Katzung, G. (2002): Einführung in die Geologie Deutschland. 6. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg Berlin.
- Herer, J. (1993): Die Wiederentdeckung der Nutzpflanze Hanf, Verlag Zweitausendeins, Frankfurt am Main. S. 25-41.
- Heslop-Harrison, J., Heslop-Harrison, Y. (1969): *Cannabis sativa* L. In: Evans L.T. (ed.): The induction of flowering; some case studies, 206-226. Cornell University Press, Ithaca (USA).
- Heuser, O., König, P., Wagner, O., Von Frank, G., Oertel, H., Oertel, F. (1927): Technologie der Textilfasern: Hanf und Hartfasern. Band V.2. Herzog, O. (Hrsg.) Springer Verlag, Berlin.
- Heyland, K.-U. (1991): Integrierte Pflanzenproduktion. Ulmer, Stuttgart.
- Hoffmann, T., Pecenka, R., Schemel, H., Gusovius, H.-J. (2013): Process-technological evaluation of harvesting hemp in winter. *Journal of Natural Fibers* 10, 159-175.
- Hoffmann, W. (1957): Flachs- und Hanfanbau. Deutscher Bauernverlag, Berlin.
- Höppner, F., Menge-Hartmann, U. (1994): Anbauversuche zur Stickstoffdüngung und Bestandesdichte von Faserhanf. *Landbauforschung Völkenrode*, 44, 314-324.
- Höppner, F., Menge-Hartmann, U. (2000): Cultivation strategies of hemp for the use of fibre and oil. *Bioresource Hemp*. Wolfsburg.
- Horne, M.R.L. (2012): Bast fibres: hemp cultivation and production. *Handbook of Natural Fibres, types, properties and factors affecting breeding and cultivation* 1, 114-145. Woodhead Publishing Limited, Kozłowski, R.M. (Hrsg.).
- Hu, Y. C., Schmidhalter, U. (2005): Drought and salinity: A comparison in their effects on mineral nutrition of plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, 541-549.



- Industrieverband Agrar. Landesarbeitskreis Düngung, Nordrhein-Westfalen (2009): Informationen zur Düngung. Ausgabe Nordrhein-Westfalen, 7. überarbeitete Ausgabe. Online: [http://www.iva.de/sites/default/files/benutzer/uid/publikationen/lad\\_nrw\\_2009.pdf](http://www.iva.de/sites/default/files/benutzer/uid/publikationen/lad_nrw_2009.pdf) (Abrufdatum: 09.01.2018).
- Ivony, I., Izsoki, Z., Van der Werf, H.M.G. (1997): Influence of nitrogen supply and P and K levels of the soil on dry matter and nutrient accumulation of fiber hemp (*Cannabis sativa* L.). *Journal of the International Hemp Association* 4, 84-89.
- Jahn-Deesbach, W. (1965): Die Düngung des Hanfes. In: *Handbuch der Pflanzenernährung und Düngung*. Axel Springer Verlag.
- Jakobey, I. (1965): Experiments to produce hemp with fine fibre. *Növénytermelés* 14(1), 45-54.
- Jalali, M., Kolahchi, Z. (2008): Ability of sorption-desorption experiments to predict potassium leaching from calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171, 785-794.
- Jankauskienė, Z., Gruzdevienė, E., (2011): Industrial hemp – a promising source for biomass production. *Renewable Energy and Energy Efficiency*, 13-18.
- Jungk, A., Claassen, N. (1986): Availability of phosphate and potassium as the result of interaction between root and soil in the rhizosphere. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 149, 411-427.
- Jungk, A., Claassen, N., Schulz, V., Wendt, J. (1993): Pflanzenverfügbarkeit der Phosphatvorräte ackerbaulich genutzter Böden. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 156, 397-406.
- Kannenbergh, H. (1943): Über die Wirkung der Verdichtung des Bodens in Zusammenhang mit dem Grundwasserstand auf den Aufwuchs von Hanf. *Bodenkunde und Pflanzenernährung*, 35(5), 205-215.
- Karus, M., Gahle, C., Pendarovski, D., Vogt, D., Ortmann, S., Grotenhermen, F., Breuer, T., Schmidt, C. (2008): Studie zur Markt- und Konkurrenzsituation bei Naturfasern (Deutschland und EU), Band 26. Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V., Marktstudie.

- Kastler, M., Molt, C., Müller F. (2015): Rahmenbedingungen für den nachhaltigen Einsatz von Kompost unter den Vorgaben der geplanten Novellierung der Düngeverordnung. VHE Verband der Humus- und Erdenwirtschaft e. V. (Hrsg.) Online: [http://www.vhe.de/fileadmin/vhe/pdfs/Publikationen/Veroeffentlichungen/ahu\\_Gutachten\\_Kompost\\_DueV\\_Langfassung.pdf](http://www.vhe.de/fileadmin/vhe/pdfs/Publikationen/Veroeffentlichungen/ahu_Gutachten_Kompost_DueV_Langfassung.pdf) (Abrufdatum: 12.04.2018).
- Kätterer, T., Reichstein, M. Andrén, O., Lomander, A. (1998): Temperature dependence of organic matter decomposition: a critical review using literature data analyzed with different models. *Biology and Fertility of Soils* 27, 258-262.
- Knappe, S., Haferkorn, U., Meissner R. (2002): Influence of different agricultural management systems on nitrogen leaching: results of lysimeter studies. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165, 73-77.
- Knoblauch, S., Albert, E., Haferkorn, U., Heyn, J., Herold, L., Lippold, T., Lehmann, E., Lorenz, J., Zachow, B., Meißner, R., Seeger, J., Schrödter, M., Strauß, C. (2013): Wirkung landwirtschaftlicher Nutzung auf die N-Auswaschung anhand langjähriger Lysimetermessungen in Mittel- und Nordostdeutschland und Schlussfolgerungen für die Minimierung der N-Befruchtung der Gewässer. Kooperation Lysimeter. Mehrländerprojekt. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena (Hrsg.).
- Koivula, M.J., Kymäläinen, H.-R., Vanne, L., Levo, S., Pehkonen, A., Sjöberg, A.-M. (2004): Microbial quality of linseed and fibre hemp plants during growing and harvest seasons. *Agricultural and Food Science* 13, 327-337.
- Körper-Grohne, U. (1987): Nutzpflanzen in Deutschland, Kulturgeschichte und Biologie. Konrad Theiss Verlag, Stuttgart.
- Körschens, M., Schulz, E., Klimanek, E.-M., Franko, U. (1997): Die organische Bodensubstanz – Bedeutung, Definition, Bestimmung. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 41(6), 427-433.
- Körschens, M., Weigel, A., Schulz, E. (1998): Turnover of soil organic matter (SOM) and long-term balances – tools for evaluating sustainable productivity of soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 161, 409-424.
- Körschens, M. (2006): The importance of long-term field experiments for soil science and environmental research – a review. *Plant, Soil and Environment* 52, 1-8.
- Köster, W., Nieder, R. (2004): Wo ist die Grunddüngung mit Phosphor, Kalium & Magnesium noch wirtschaftlich? 1. Auflage. Bayer Handelsvertretung, Berlin.

- Kozłowski, R., Jaranowska, B., Tymkow, J., Mankowski, J., Baraniecki, P., Grabowska, L. (1995): Breeding, cultivation and application of hemp in Poland. *Bioresource Hemp: Proceedings of the Symposium: Frankfurt am Main, Germany*, 58-68.
- Kraenzel, D.G., Petry, T., Nelson, B., Anderson, M.J., Mathern, D., Todd, R. (1998): Industrial hemp as an alternative crop in North Dakota. *Agricultural Economics Report 402*. North Dakota State University.
- Krüger, K. (2000): Mehrjährige Untersuchungen zum Hanfanbau in Brandenburg. Tagungsband zum Symposium 3: Biorohstoff Hanf & andere Faserpflanzen. nova-Institut, Deutschland.
- Krzysch, G., Caesar, K., Becker, K., Brodowski, M., Dressler, U.-B., Grimm, J., Jancke, G., Krause, S., Schlenther, L. (1992): Einfluss von langjährig differenzierten Bewirtschaftungsmaßnahmen und Umweltbelastungen auf Bodenfruchtbarkeit und Ertragsleistung eines lehmigen Sandbodens. Technische Universität Berlin.
- Kuchenbuch, R.O., Buczko, U. (2011): Re-visiting potassium- and phosphate-fertilizer responses in field experiments and soil-test interpretations by means of data mining. *Journal of Plant Nutrient and Soil Science* 174, 171-185.
- Kuderna, M., Weinberger, C., Fuchs, G., Murer, E. (2014): Forschungsprojekt Lysimeter, Technischer Endbericht 2013. Land Oberösterreich, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.). Online: [http://www.land-oberoesterreich.gv.at/files/publikationen/gtw\\_lysimeter\\_endbericht.pdf](http://www.land-oberoesterreich.gv.at/files/publikationen/gtw_lysimeter_endbericht.pdf) (Abrufdatum: 16.03.2018).
- Kuntze, H., Roeschmann, G., Schwertfeger, G. (1994): *Bodenkunde*, Eugen Ulmer Stuttgart.
- Kymäläinen, H.-R., Hautala, M., Kuisma, R., Pasila, A. (2001): Capillarity of flax/linseed (*Linum usitatissimum* L.) and fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) straw fractions. *Industrial Crops and Products* 14, 41-50.
- Kymäläinen, H.-R., Pasila, A. (2000): Equilibrium moisture content of flax/linseed and fibre hemp straw fractions. *Agricultural and Food Science in Finland* 9, 259-268.
- Lal, R. (2014): Climate strategic soil management. *Challenges* 5, 43-74. Online: <https://doi.org/10.3390/challe5010043> (Abrufdatum: 14.01.2018).
- Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Münster (2014): Mittlere Nährstoffgehalte organischer Dünger. Online: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/naehrstoffgehalte-organischer-duenger.pdf> (Abrufdatum: 28.11.2017).

- Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Münster (2015): Düngung mit Phosphat, Kali und Magnesium. Online: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/phosphat-kalium-magnesium-pdf.pdf> (Abrufdatum 16.03.2018).
- Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Münster (2015): Stickstoffdüngung im Getreide. Online: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/getreide/getreide-n-duengung-pdf.pdf> (Abrufdatum 20.05.2018).
- Landwirtschaftskammer Nordrhein Westfalen, Münster (2018): Förderung von Agrarumweltmaßnahmen – Anbau vielfältiger Kulturen im Ackerland. Online: <https://www.landwirtschaftskammer.de/foerderung/laendlicherraum/aum/ackerbauvielfalt.htm> (Abrufdatum 05.07.2018).
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung 2018: Effizient düngen – Anwendungsbeispiele zur Düngeverordnung. Online: <https://ble-medienservice.de/1770/effizient-duengen-anwendungsbeispiele-zur-duengeverordnung> (Abrufdatum 28.11.2017).
- Lang, H., Dressel, J. (2008): N-P-K-Düngungseffekte in landwirtschaftlichen Kulturen auf zwei bodenmäßig verschiedenen, aber klimatisch einheitlichen Standorten – 40 bzw. 60 Jahre Dauerfeldversuche Limburgerhof. *Archives of Agronomy and Soil Science* 42(3-4), 211-234.
- Lenka, N.K., Lal, R. (2013): Soil aggregation and greenhouse gas flux after 15 years of wheat straw and fertilizer management in a no-till system. *Soil and Tillage Research* 126, 78-89.
- Leinweber, P., Schulten, H.-R., Körschens, M. (1994): Seasonal variations of soil organic matter in a long-term agricultural experiment. *Plant and Soil* 160, 225-235.
- Leinweber, P., Schulten, H.-R., Körschens, M. (1995): Hot water extracted organic matter: chemical composition and temporal variations in a long-term field experiment. *Biology and Fertility of Soils* 20, 17-23.
- Léon, J., Schulze Lammers, P., Haverkamp, M., Roller, O. (2004): Faserqualität einheimischer Faserpflanzen, die Bedeutung umweltbedingter Variabilität für die Ertrags- und Qualitätsbildung einheimischer Faserpflanzen, sowie die Methodenentwicklung zur Qualitätsüberprüfung. *Forschungsbericht Heft Nr. 120. Lehr- und Forschungsschwerpunkt „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“*. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn (Hrsg.).

- Léon, J., Von Francken-Welz, H. (2000): Vergleichende Bewertung der Leistungspotentiale und Faserqualität verschiedener Hanfpflanzen und Entwicklung von umweltverträglichen Anbauverfahren zur Produktion von qualitativ hochwertigen Industriefasern, Forschungsberichte Heft 82. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn (Hrsg.).
- Leppin, T. (2007): Mobilisationspotentiale unterschiedlicher Pflanzen für stabile Phosphatformen im Boden. Dissertation. Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotoxologie und Umweltmanagement. Justus-Liebig-Universität Gießen.
- Li, H., Feng, W., He, X., Zhu, P., Gao, H., Sun, N., Xu, M. (2017): Chemical fertilizers could be completely replaced by manure to maintain high maize yield and soil organic carbon (SOC) when SOC reaches a threshold in the Northeast China Plain. *Journal of Integrative Agriculture* 16(4), 937-946.
- Liang, B. C., MacKenzie, A.F., Schnitzer, M., Monreal, C.M., Voroney, P.R., Beyaert, R.P. (1998): Management induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils. *Biology and Fertility of Soils* 26, 88-94.
- Liao, Y., Wu, W., Meng, F., Li, H. (2016): Impact of agricultural intensification on soil organic carbon: A study using DNDC in Huantai County, Shandong Province, China. *Journal of Integrative Agriculture* 15(6), 1364-1375.
- Liedtke, H., Marcinek, J. (1994): *Physische Geographie Deutschlands*, Klett-Perthes, Gotha und Stuttgart, Kapitel 8: Das Norddeutsche Tiefland, S. 386-461.
- Lisson, S.N., Mendham, N.J. (2000): Cultivar, sowing date and plant density studies of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) in Tasmania. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 40, 975-986.
- Lopez-Bellido, L., Fuentes, M., Castillo, J.E., Lopez-Garrido, F.J., Fernandez, E.J. (1996): Long-term tillage, crop rotation and nitrogen fertilizer effects on wheat yield under rain-fed Mediterranean conditions. *Agronomy Journal* 88, 783-791.
- Lohmeyer, D. (1997): *Die Hanfernte. Statusbericht und Ausblick*. 2. Auflage. Nova-Institut, Deutschland.
- Low, I. (1995): UK Hemp Production. *Bioresource Hemp: Proceedings of the Symposium: Frankfurt am Main, Germany*, 106-108.
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen – LWK NI (Hrsg.) (2006): *Gewässerschonende Landwirtschaft vor dem Hintergrund der Anforderungen der Wasserrahmenrichtlinie*. Informationsbroschüre anlässlich der Wasser- schutztage in Liebenau & Hohenzethen für Auszubildende und Fachschüler im Rahmen des Projektes WAgriCo. Hannover 2006.

- Maci, A. (2001): Der extrahierbare organische Stickstoff und Kohlenstoff in Böden und ihre Bedeutung für die Stickstoffmineralisation, untersucht mittels Elektro-Ultrafiltration (EUF). Dissertation. Fachbereich Agrarwissenschaften, Justus-Liebig-Universität, Gießen.
- Maiwald, K., Frank, A. (1936): Die Beteiligung des Kaliums an der Stoffherzeugung der höheren Pflanze. Teil I: Über Kaliumwirkung und Photosynthese. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* (41) 1-2, 8-28.
- Malavolta, E. (1985): Potassium status of tropical and subtropical region soils. In: *Potassium in agriculture*, Munson E. (Hrsg.). American Society of Agronomy, 163-200.
- Mariotti, M., Masoni, A., Ercoli, L., Arduini, I. (2015): Nitrogen leaching and residual effect of barley/field bean intercropping. *Plant, Soil and Environment* 61(2), 60-65.
- Marquering, J., Scheufler, B. (2006): Präzise Saat durch Körnerzähler Sensor. *Agricultural Engineering* 61(5), 248-249.
- Marrot, L., Lefeuvre, A., Pontoire, B., Bourmaud, A., Baley, C. (2013): Analysis of the hemp fiber mechanical properties and their scattering (Fedora 17). *Industrial Crops and Products* 51, 317-327.
- Martinez, J., Guirand, G. (1990): A lysimeter study of the effects of a ryegrass catch crop, during a winter wheat/maize rotation, on nitrate leaching and on the following crop. *Journal of Soil Science* 41, 5-16.
- Mastel, K., Stolzenburg, K., Seith, B. (1998): Informationen für die Pflanzenproduktion – Untersuchungen zu pflanzenbaulichen, erntetechnischen und ökonomischen Fragen des Anbaus von Faser- und Körnerhanf. Heft 7/1998. Landesanstalt für Pflanzenbau, Forchheim.
- Masunga, R. H., Uzokwe, V. N., Mlay, P.D., Odeh, I., Singh, A., Buchan, D., De Neve, S. (2016): Nitrogen mineralization dynamics of different valuable organic amendments commonly used agriculture. *Applied Soil Ecology* 101, 185-193.
- Mazzarino, M.J., Szott, L., Jimenez, M. (1993): Dynamics of soil total C and N, microbial biomass, and water-soluble C in tropical agroecosystems. *Soil Biology and Biochemistry* 25, 205-214.
- McCracken, D.W., Machown, C.T., Smith, M.S. (1987): Hairy vetch and ammonium nitrogen sources: impact on corn nutrition and nitrate leaching. *American Society of Agronomy*, abstract 209.

- McLaren, R. G., Cameron, K. C. (2005): Soil Science: Sustainable production and environmental protection. Oxford University Press, Melbourne, pp 1-304.
- McLenaghan, R.D., Cameron, K.C., Lampkin, N.H., Daly, M.L., Deo, B. (1996): Nitrate leaching from ploughed pasture and the effectiveness of winter catch crops in reducing leaching losses. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 39(3), 413-420.
- McTiernan, K.B., Jarvis, S.C., Scholefield, D., Hayes, M.H.B. (2001): Dissolved organic carbon losses from grazed grassland. In: Rees, R.M., Ball, B.C. Campbell, C.D., Watson, C.A. (Hrsg.), *Sustainable Management of soil organic matter*. CAB International, CABI Publishing, New York, 264-273.
- Medialvilla, V., Bassetti, P., Konermann, M., Schmidt-Slembrouck, I. (1998a): Optimierung der Stickstoffdüngung und Saatmenge im Hanfanbau. *Agrarforschung* 5(5), 241-244.
- Mediavilla, V., Bassetti, P., Leupin, M., Mosimann, E. (1999): Agronomische Eigenschaften von Hanfsorten. *Agrarforschung* 6 (10), 393-396.
- Mediavilla, V., Jonquera, M., Schmid-Slembrouk, I., Soldati, A. (1998b): Decimal code for growth stages of hemp (*Cannabis sativa* L.). *Journal of the International Hemp Association* 5(2), 65, 68-74.
- Mediavilla, V., Leupin, M., Keller, A. (2001): Influence of the growth stage of industrial hemp on the yield formation in relation to certain fibre quality traits. *Industrial Crops and Products* 13, 49-56.
- Meijer, W.J.M., Van der Werf, H.M.G., Mathijssen, E.W.J.M., Van den Brink, P.W.M. (1995): Constraints to dry matter production in fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). *European Journal of Agronomy* 4, 109-117.
- Meissner, R., Seeger, J. Rupp, H. (1998): Lysimeter studies in East Germany concerning the influence of set aside of intensively farmed land on the seepage water quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 67, 161-173.
- Meister, E., Mediavilla, V., Vetter, R. Konermann, M. (1999): Prüfung des Anbaus und der Möglichkeit einer Markteinführung von neuen Faserpflanzen (Hanf, Kenaf, Miscanthus). Abschlussbericht Projekt A. 3.1. Grenzüberschreitendes Institut zur rentablen umweltgerechten Landbewirtschaftung (ITADA) (Hrsg.). Online: [www.itada.org/download.asp?id=A31dL.pdf](http://www.itada.org/download.asp?id=A31dL.pdf) (Abrufdatum 15.01.2018).
- Meynen, E., Schmidhüsen, J. (1959): *Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands*. 6. Lieferung, Bundesanstalt für Landeskunde, Remagen.

- Merbach, W., Garz, J., Schliephake, W., Stumpe, H., Schmidt, L. (2000): The long-term fertilization experiments in Halle (Saale), Germany – Introduction and survey. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163, 629-628.
- Meynen, E., Schmithusen, J. (1959): *Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands*, Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung.
- Miao, H.T., Lü, J.L., Xu, M.G., Zhang, W.J., Huang, S.M., Peng, C., Chen, L.M. (2015): Carbon and nitrogen allocations in corn grown in Central and Northeast China: Different responses to fertilization treatments. *Journal of Integrative Agriculture* 14, 1212-1221.
- Mielke, H., Schöber-Butin, B. (2002): *Plant protection for re-growing industrial plants, sugar beet, oil- and fibre plants*. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin und Braunschweig, Parey Buchverlag Berlin.
- Moir, J., Seidel, M., Kayser, M. (2013): Potassium dynamics of four grassland soils contrasting in soil K management history. *Japanese Society of Grassland Science* 59, 1-10.
- Müller, M., Richert, K.: *Geologie Deutschland* Ingenieurbüro für Kartographie, Gotha. Online: <http://www.mr-kartographie.de/uploads/pics/Geologie-Deutschland.jpg> (Abrufdatum 27.01.2017).
- Munk, H. (1985): Ermittlung wirtschaftlich optimaler Phosphatgehalte auf Löss- und Geschiebelehm Böden auf Basis der CAL-Methode. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 148, 193-213.
- Munk, H., Heyn, J., Rex, M. (2005): Vergleichende Betrachtung von Verfahren zur Auswertung von Nährstoffsteigerungen am Beispiel Phosphor. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, 789,796.
- Münzer, W. (1999): Zusammenfassende Ergebnisse aus Forschungsvorhaben mit ausgewählten Rohstoffpflanzen. 7. Symposium: Im Kreislauf der Natur – Naturstoffe für die moderne Gesellschaft. *CARMEN e.V.*, 6/1999, 95-113.
- Müssig, J., Martens, R. (2003): Quality aspects in hemp fibre productions – influence of cultivation, harvesting and retting. *Journal of Industrial Hemp* 8(1), 11-32.
- Müssig, J., Fischer, H., Graupner, N., Drieling, A. (2010): Testing methods for measuring physical and mechanical fibre properties, In: J. Müssig (Hrsg.), *Industrial applications of natural fibres: structure, properties and technical applications*, Kapitel 13, S. 269–311. 1. Auflage, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.



- Neeteson, J.J. (1995): Nitrogen management for intensively grown arable crops and field vegetables. In: Bacon, P., Nitrogen fertilization in the environment. Marcel Dekker Verlag, New York.
- Neilsen, N.E., Jensen, H.E. (1985): Soil mineral nitrogen as affected by undersown catch crops. Pp. 101-110. In: Assessment of nitrogen fertilizer requirements, Neeteson, J.J., Dilz, K. (Hrsg.). Institute of Soil Fertility, Haren, Netherlands.
- Neyroud, J.-A., Lischer, P. (2003): Do different methods used to estimate soil phosphorous availability across Europe give comparable results? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166, 422-431.
- Nieder, R., Richter, J. (2000): C and N accumulation in arable soil of West Germany and its influence on the environment – Developments 1970 to 1998. *Journal of Plant Nutrient and Soil Science* 163, 65-72.
- Nykter, M. (2006): Microbial quality of hemp (*Cannabis sativa* L.) and flax (*Linum usitatissimum* L.) from plants to thermal insulation. Dissertation. Department of Agrotechnology, University of Helsinki.
- Obour, P.B., Jensen, J.L., Lamandé, M., Watts, C.W., Munkholm, L.J. (2018): Soil organic matter widens the range of water contents for tillage. *Soil and Tillage Research* 182, 57-65.
- Oliveira, M.W., Trivelin, P.C.O., Boaretto, A.E., Muraoka, T., Mortatti, J. (2002): Leaching of nitrogen, potassium, calcium and magnesium in a sandy cultivated with sugarcane. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasilia* 37(6), 861-868.
- Ordon, F., Friedt, W. (2000): Erfassung und Nutzung der Bioversität bei landwirtschaftlichen Kulturpflanzen unter besonderer Berücksichtigung molekularer Markertechniken. *Pflanzenbauwissenschaften* 4(2): 83-90.
- Pallesen, B.E. (1996): The quality of comine-harvested fibre flax for purposes on the degree of retting. *Industrial Crops and Products* 5, 65-78.
- Papastylianou, P., Kakkbouki, I., Travlos, I. (2018): Effect of nitrogen fertilization on growth and yield of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 46(1), 197-201.
- Pasila, A. (2000): The effect of frost on fibre plants and their processing. Section A. *Molecular Crystals and Liquid Crystal Science and Technology* 353(1), 11-22.

- Pasila, A. (2004): Dry-line-method in bast fibre production. Academic Dissertation. University of Helsinki.
- Peschke, H. (1997): 60 Jahre Statische Versuche in Thyrow – Bedeutung, Ergebnisse und Ausblick, Archives of Agronomy and Soil Science 42(3-4), 169-179.
- Power, J.F., Schepers, J.S. (1989): Nitrate contamination of groundwater in North America. Agriculture ecosystems and Environments 26, 165-187.
- Prjanischnikow, D.N. (1930): Spezieller Pflanzenbau – Der Anbau der landwirtschaftlichen Kulturpflanzen, Springer Verlag Berlin.
- o.V. (o.J.): Tausendkorngewicht der wichtigsten Samen. Telgte. Online: [http://www.raiffeisen.com/pflanzen/ackermanager/saatgut\\_tkg\\_html](http://www.raiffeisen.com/pflanzen/ackermanager/saatgut_tkg_html) (Abrufdatum: 25.02.2018).
- Ratzke, U., Mohr, H.-J. (2005): Böden in Mecklenburg-Vorpommern, Abriss ihrer Entstehung, Verbreitung und Nutzung. 2. Auflage. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.). Online: <https://www.lung.mv-regierung.de/dateien/boedenmv.pdf> (Abrufdatum: 16.03.2018).
- Ramsbeck-Ullmann, M. (2006): Landnutzungswandel und Stickstoffauswaschung im Einzugsgebiet der Parthe. Modellierung und Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Landnutzung. Dissertation. Lehrstuhl für Landschaftsökologie der Technischen Universität München.
- Reuter, K. (1987) Anbau und Verwendung von Hanf (*Cannabis sativa*) als Lieferant von Fasern, Samen und Rauschdrogen. Diplomarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelm Universität, Bonn.
- Richter, U., Harrach, T., Schmücker, M. (1994): Abschätzungen der Nitratverlagerung für repräsentative Testflächen in drei hessischen Wasserschutzgebieten. o.O.
- Riegler-Nurscher, S. (2009): Hanfanbau und Vermarktung. Fachtagung Biologischer Ackerbau, Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein.
- Rijavec, T., Janjić, S., Ačko, D. K. (2017): Revitalization of industrial hemp *Cannabis sativa* L. var. *sativa* in Slovenia: a study of green hemp fibres. Tekstilec 60(1), 36-48.
- Röhricht, C., Schulz, J. (2000): Ergebnisse von Untersuchungen zu Anbau, Ernte, Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit von Flachs und Hanf unter sächsischen Bedingungen, 1. Auflage. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.). Online: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13583> (Abrufdatum. 25.03.2018).

- Roller, O. (2009): Einfluss der Grünenthalzung und der Ammoniumdepotdüngung auf den Ertrag und die Qualität von Faserhanf. Institut für Landtechnik der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Online-Dissertation. Online: [http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss\\_online](http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online) (Abrufdatum: 08.11.2017).
- Rößler, T. (2012): Einfluss des Standortes und der Sorte auf den Samen- und Restpflanzen-ertrag (Fasern und Schäben) bei Hanf (*Cannabis sativa* L.). Masterarbeit. Universität Wien.
- Rowell, D. L. (1994): Bodenkunde: Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 379-400.
- Rupp, H., Meissner, R., Leinweber, P. (2018): Plant available phosphorus in soil as predictor for the leaching potential: Insights from long-term lysimeter studies. *Ambio* 47(1), 103-113.
- Sainju, U.M., Lenssen, A.W., Allen, B.L., Stevens, W.B., Jabro, J.D. (2017): Soil total carbon and nitrogen in crop yields after eight years of tillage, crop rotation and cultural practice. *Heliyon* 3. Online: <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00481> (Abrufdatum: 28.08.2018).
- Salentijn, E.M.J., Zhang, Q., Amaducci, S., Yang, M., Trindade L.M. (2015): New developments in fiber hemp (*Cannabis sativa* L.) breeding. *Industrial Crops and Products* 68, 32-41.
- Sankari, H. (2000a): Towards bast fibre production in Finland: stem and fibre yields and mechanical fibre properties of selected fibre hemp and linseed genotyps. Dissertation. Agricultural Research Centre of Finland, Helsinki.
- Sankari, H. (2000b): Comparison of bast fibre yield and mechanical fibre properties of hemp (*Cannabis sativa* L.) cultivars. *Industrial Crops and Products* 11, 73-84.
- Schachtschabel, P. (1985): Beziehung zwischen dem durch K-Düngung erzielbaren Mehrertrag und dem K-Gehalt der Böden nach Feldversuchen in der Bundesrepublik Deutschland. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 148, 439-458.
- Schäfer, T. (2003): Wirkungen von Wachstumsfaktoren und pflanzenbauliche Maßnahmen auf Biomasse- und Faserertrag sowie Faserqualität von Hanf (*Cannabis sativa* L.). Dissertation Justus-Liebig Universität Gießen, Shaker Verlag Aachen.
- Scharrer, K., Schreiber, R. (1943): Über die Wirkung kombinierter Kalium- und Magnesiumgaben auf das Erntegewicht sowie den Eiweiß- und Fettertrag von Hanf (*Cannabis sativa* L.). *Bodenkunde und Pflanzenernährung* 30(6), 370-380.

- Scheel, R. (1937): Anbau von Flachs und Hanf. Deutsches Forschungsinstitut für Bastfasern, Sorau.
- Scheer-Triebel, M., Léon, J. (2000): Industriefaser – Qualitätsbeschreibung und pflanzenbauliche Beeinflussungsmöglichkeiten bei Faserpflanzen: ein Literaturreview. *Pflanzenbauwissenschaften* 4(1): 26-41.
- Schilling, G. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. Ulmer Stuttgart.
- Schindlbacher, A., Zechmeister-Boltenstern, S., Jandl, R. (2009): Carbon losses due to soil warming: Do autotrophic and heterotrophic soil respiration respond equally? *Global Change Biology* 15(4), 901-913.
- Schluttenhofer, C., Yuan, L. (2017): Challenges towards revitalizing hemp: A multifaced crop. *Trends in Plant Science* 22(11), 917-929.
- Schmid, K. (1941): Der Einfluss von Kalium-, Stickstoff- und Wasserversorgung auf die Transpiration und Assimilationsleistung des Hafers. Die Beteiligung des Kaliums an der Stofferzeugung der höheren Pflanze. Teil III. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 25 (5-6), 279-313.
- Schmied, B., Kohler, A., Schulin, R., Fritsch, M. (2000): Nitrataustrag aus einem dränierten, humusreichen und landwirtschaftlich genutzten Boden. Institut für terrestrische Ökologie, Zürich. pp 113.
- Schönberger, H. (2000): Organische Dünger richtig bewerten. In: *top agrar* 7, 58-63. Online: <https://www.topagrar.com/archiv/Organische-Duenger-richtig-bewerten-198762.html%3Faction%3Ddownload+&cd=2&hl=de&ct=clnk&gl=de> (Abrufdatum: 10.02.2018).
- Schulz, J. (1999): Anbau und Verwertung von Hanf (*Cannabis sativa* L.). Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden.
- Schulz, E. (2002): Influence of extreme management on decomposable soil organic matter pool. *Archiv für Acker-, Pflanzenbau und Bodenkunde* 48, 101-105.
- Schumann, E., Peil, A., Weber, W.E. (1999): Preliminary results of a German field trial with different hemp (*Cannabis sativa* L.) accessions. *Genetic Resources and Crop Evolution* 46, 399-407.
- Šeremešić, S., Milošev, D., Skulić, P., Nešić, L. Čirić, V. (2013): Total and hot-water extractable carbon relationship in Chernozem soil under different cropping systems and land use. *Journal of Central European Agriculture* 14(4), 1479-1487.

- Sestak, I., Mesic, M., Zgorelec, Z., Kisic, I., Basic, F. (2014): Winter wheat agronomic traits and nitrate leaching under variable nitrogen fertilization. *Plant, Soil and Environment* 60(9), 394-400.
- Shepherd, M.A., Davies, D.B., Johnson, P.A. (1993): Minimizing nitrate losses from arable soils. *Soil Use and Management* 9(3), 94-99.
- Sieling, K., Günther-Borstel, O., Hanus, H. (1996): Effect of slurry application and mineral nitrogen fertilization on N leaching in different crop combinations. *Journal of Agriculture Science, Cambridge*, 128, 79-86.
- Sleutel, S., De Neve, S., Singer, B., Hofman, G. (2006): Organic C levels in intensively managed arable soils – long-term regional trends and characterization of fractions. *Soil Use and Management* 22, 188-196.
- Small, E., Pocock, T. Cavers, P.B. (2003): The biology of Canadian weeds. 119. *Cannabis sativa* L. *Canadian Journal of Plant Science* 83, 217-237.
- Smith, K.A., Chambers, B.J. (1993): Utilizing the nitrogen content of organic manures on farms – problems and practical solutions. *Soil Use and Management* 9(3), 105-112.
- Snegireva, A., Chernova, T., Ageeva, M., Lev-Yadun, S., Gorshkova, T. (2015): Intrusive growth of primary and secondary phloem fibres in hemp stem determines fibre-bundle formation and structure. *AoB Plants* 7, 1-14.
- Stauffer, W., Spiess, E. (2001): Einfluss unterschiedlicher Fruchtfolgen auf die Nitratauswaschung. *AgrarForschung* 8(8), 324-329.
- Steffens, D. (2009): Einfluss einer Mineraldüngung auf das Wachstum von Deutschen Weidelgras und Senf, Justus-Liebig-Museum in Gießen. Online: [https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/wasser/hydrogeologie/Fortbildungs-\\_und\\_Vortragsveranstaltungen/2017/STEFFENS\\_Phosphorduengung\\_Anpassung\\_erforderlich.pdf](https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/wasser/hydrogeologie/Fortbildungs-_und_Vortragsveranstaltungen/2017/STEFFENS_Phosphorduengung_Anpassung_erforderlich.pdf) (Abrufdatum: 15.03.2018).
- Steinmann, T., Welp, G., Holbeck, B., Amelung, W. (2016): Long-term development of organic carbon contents in arable soil of North Rhine-Westphalia, Germany, 1979-2015. *European Journal of Soil Science* 67, 616-623.
- Strebel, O., Duynisfeld, W.H.M., Böttcher, J., (1989). *Agricultural Ecosystems and Environment* 26, 189-214. Zit. in Scheffer & Schachtschabel, 1998.

- Strohm-Lömpcke (2006): Recherche zu Forschungs-, Entwicklungs- und Modellvorhaben mit Beiträgen zur innovativen Nutzung und Erhaltung von Agrarbiodiversität. Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Verbraucherschutz (Hrsg.). Online: <http://nova-institut.de/news-images/20060607-05/OnlineRecherche.pdf> (Abrufdatum: 15.01.2018).
- Struik, P.C., Amaducci, S., Bullard, M. J., Stutterheim, N.C., Venturi, G., Cromack, H.T.H. (2000): Agronomy of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) in Europe. *Industrial Crops and Products* 11, 107-118.
- Stumpe, H., Garz, J., Johannemann, R., Buchte, M. (1989): Der Einfluss der K-Düngung auf den Ertrag und einige Bodeneigenschaften in einem Dauerversuch auf einer Sandlöss-Braun-Schwarzerde in Halle. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 33,301-310.
- Stumpe, H., Garz, J., Scharf, H. (1994): Wirkung der Phosphatdüngung in einem 40jährigen Dauerversuch auf einer Sandlöss-Braunschwarzerde in Halle. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 157, 105-110.
- Sturm, S., Kiefer, J. (2005): Bestimmung der Nitratauswaschung für die Beratungspraxis der Wasserversorgung – Einsatz von Freilandlysimetern zur Ableitung einer Vorgehensweise bei räumlicher und zeitlicher Dynamik in der Agrarlandschaft. Bericht über die 11. Gumpensteiner Lysimetertagung, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning, 217-219.
- Stutterheim, N.C., Amaducci, S., Gorchs Altarriba, G., Sankari, H., Dreyer, J. (1999): Quantified framework for hemp (*Cannabis sativa* L.) production throughout Europe as tool to fine-tune crop component quantity and quality. In: Delegate Manual of the Sixth Symposium on Renewable Resources for the Chemical Industry, together with the Fourth European Symposium on Industrial Crops and Products. Bonn, Germany.
- Suarez-Tarpia, A., Rasmussen, J., Thomsen, I.K., Christensen, B.T. (2018): Early sowing increases nitrogen uptake and yields of winter wheat grown with cattle slurry or mineral fertilizers. *The Journal of Agricultural Science*, 1-11.
- Sümer, M.R. (2012): Auswirkungen verschiedener Bodennutzungssysteme auf ausgewählte physiko-chemische Bodeneigenschaften und pflanzenbauliche Parameter in Berlin-Dahlem und Dedelow. Dissertation. Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Humboldt-Universität, Berlin.
- Sumner, M. (2000): Handbook of soil science. CRC Press, New York. 1-2148.

- Syers, J.K. (1998): Soil and plant potassium in agriculture. In: International Fertilizer Society Proceedings, York, UK, 1-32.
- Tahir, P.M., Ahmed, A.B., SaifulAzry, S.O.A., Ahmed, Z. (2011): Retting process of some bast plant fibres and its effect on fibre quality: A review. *BioResources* 6(4), 5260-5281.
- Tang, K., Struik, P.C., Amaducci, S., Stomph, T.-J., Yin, X. (2017): Hemp (*Cannabis sativa* L.) leaf photosynthesis in relation to nitrogen content and temperature: implication for hemp as bio-economically sustainable crop. *GCB Bioenergy* 9, 1573-1587.
- Thomas, B.W., Whalen, J.K., Sharifi, M., Chantigny, M., Zebarth, B. (2016): Labile organic matter fractions as early-season nitrogen supply indicators in manure-amended soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 179, 94-103.
- Thornthwaite, C.W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. *American Geographical Society* 38(1), 55-94.
- Thygesen, A. (2006): Properties of hemp fibre polymer composites – an optimization of fibre properties using novel defibration methods and fibre characterization. Dissertation. Royal Agricultural and Veterinary University of Denmark.
- Tian, K., Zhao, Y.C., Xu, X.H., Hai, N., Huang, B., Deng, W.J. (2015): Effects of long-term fertilization and residue management on soil organic carbon changes in paddy soils of China: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 204, 40-50.
- Tripolskaja, L., Baksiene, E., Razukas, A., Sidlauskas, G. (2016): How organic fertilizers change chemical element leaching: a summary of the Lysimeter studies in Lithuania 1987-2014. *Polish Journal of Environmental Studies* 25(6), 2589-2599.
- Tripolskaja, L., Verbylienė, I. (2014): The effect of different forms of nitrogen fertilizers on nitrogen leaching. *Zemdirbyste-Agriculture* 101(3), 243-248.
- Umweltbundesamt (2018): Bericht des Bundesministeriums für Gesundheit und des Umweltbundesamtes an die Verbraucherinnen und Verbraucher über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasser) in Deutschland 2014-2016. Umweltbundesamt (Hrsg.) Online: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/374/publikationen/2018-05-22\\_uug\\_02-2018\\_trinkwasserqualitaet\\_2014-2016.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/374/publikationen/2018-05-22_uug_02-2018_trinkwasserqualitaet_2014-2016.pdf) (Abrufdatum: 03.06.2018).
- Väisänen, T., Batello, P., Lappalainen, R., Tomppo, L. (2018): Modification of hemp fibres (*Cannabis sativa* L.) for composite applications. *Industrial Crops and Products* 111, 422-429.

- Van der Werf, H.M.G. (1991): Agronomy and crop physiology of fibre hemp: a literature review. CABO Report 142. Center for Agrobiological Research (CABO-DLO, Wageningen).
- Van der Werf, H.M.G., Van Geel, W.C.A., Van Gils, L.J.C., Haverkort, A. J. (1995b): Nitrogen fertilization and row affect self-thinning and productivity of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). *Field Crops Research* 42, 27-37.
- Van der Werf, H.M.G., Wijnhuizen, M., de Schutter, J. A. A. (1995c): Plant density and self-thinning affect yield and quality of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). *Field Crops Research* 40, 153-164.
- Van der Werf, H.M.G., Van den Berg, W., (1995a): Nitrogen fertilization and sex expression affect size variability of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). *Oecologia* 103(4), 462-470.
- Van der Werf, H.M.G., Van der Veen, J.E., Bouma, A.T.M., Ten Cate, M. (1994): Quality of hemp (*Cannabis sativa* L.) stems as raw material for paper. *Industrial Crops and products* 2, 219-227.
- VDLUFA (1997): Standpunkt "Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. VDUFA (Hrsg.) Darmstadt.
- VDLUFA (1998): Standpunkt „Kalium-Düngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. Richtwerte für die Gehaltsklasse C. VDLUFA (Hrsg.) Darmstadt.
- VDLUFA Standpunkt (2017): Anforderungen an Bodenuntersuchungsmethoden zur Düngbedarfsermittlung. VDLUFA (Hrsg.), Speyer.
- Vera, C.L., Malhi, S.S., Phelps, S.M., May, W.E., Johnson, E.N. (2010): N, P and S fertilization effects on industrial hemp in Saskatchewan. *Canadian Journal of Plant Science* 90, 179-184.
- Vera, C.L., Malhi, S.S., Raney, J.P., Wang, Z.H. (2004): The effect of N and P fertilization on growth, seed yield and quality of industrial hemp in the Parkland region of Saskatchewan. *Canadian Journal of Plant Science* 84, 939-947.
- Verband der Landwirtschaftskammern (2012): Zwischenfrüchte für Futternutzung und Gründüngung. Online: <https://www.landwirtschaftskammer.de/riswick/pdf/fb-zwischenfruechte-2012.pdf> (Abrufdatum: 16.03.2018).



- Vereet, J.-A., Wittrock, A.F., Hoffmann, G.M. (1995): Krankheiten, Schädlinge und Unkräuter im Hanf und deren Bekämpfung. Teilgutachten zum Gutachten „Anbau, Ernte und Aufbereitung sowie Verwendung von Hanf“. Bundesanstalt für nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Kiel.
- Vogl, C.R. (1997): Praktische Anbauerfahrung mit Hanf (*Cannabis sativa* L.) in Österreich. Tagungsband zum Symposium 2. Biorohstoff Hanf, nova-Institut (Hrsg.), 244-253.
- Von Buttlar, H.-B., Höppner, F., Menge-Hartmann, U., Scheffer, K., Mispelhorn, B. (1997): Europäische Hanfsorten im Standortvergleich zweier deutschen Anbauregionen. Nova Institute (Hrsg.) Bioresource Hemp, Proceedings of the Symposium Frankfurt/Main, 209-219.
- Von Francken-Welz, (2003): Vergleichende Bewertung der Ertragsfähigkeit und Faserqualität von Lein (*Linum usitatissimum* L.), Hanf (*Cannabis sativa* L.) und Fasernessel (*Urtica dioica* L.) zur Produktion hochwertiger Industriefasern. Dissertation Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenbau. Shaker Verlag, Aachen.
- Von Francken-Welz, H., Léon, J. (2003): Faserqualität einheimischer Faserpflanzen (Hanf) – Bewertung von Rohstoff und Endprodukt. Forschungsbericht Nr. 112. Lehr- und Forschungsschwerpunkt „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft, Landwirtschaftlich Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Wagger, M.G., Mengel, D.B. (1988): The role of nonleguminous cover crops in the efficient use of water and nitrogen, pp. 115-127. In: Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen, Hargrove, W.L. (Hrsg.). American Society of Agronomy, special publications 51.
- Walter, H., Lieth, H. (1967): Klimadiagramm-Weltatlas, Fischer-Verlag, Jena.
- Wang, S., Gusovius, H.-J., Lühr, C., Musio, S., Uhrlaub, B., Amaducci, S., Müssig, J. (2018): Assessment system to characterise and compare different hemp varieties based on a developed lab-scaled decortication system. Industrial Crops and Products 117, 159-168.
- Wantulla, A., Vollmer, F.J., Kühbauch, W. (1988): Ganzjährige Bodenwasseruntersuchungen zur Bestimmung von Mineralisations und Nitrataustrag in einem schwach gedüngten Löss-Boden. Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung 29,140-147.
- Waskow, F. (1995): Hanf & Co. Die Renaissance der heimischen Faserpflanzen. Katalyse-Institut für angewandte Umweltforschung (Hrsg), Verlag Die Werkstatt.

- Weihrauch, C. (2017): Phosphor-Dynamiken in Böden. Grundlagen, Konzepte und Untersuchungen zur räumlichen Verteilung des Nährstoffes. Dissertation. Philipps-Universität Marburg. Springer Verlag.
- Weller, D.E. (1987): A reevaluation of the  $-3/2$  power rule of plant self-thinning. *Ecological Monographs* 57(1), 23-43.
- Wessolek, G., Kaupenjohann, M., Dominik, P., Ilg, K., Schmitt, A., Zeitz, J., Gahre, F., Schulz, E., Ellerbrock, R., Utermann, J., Düwel, O., Siebner, C. (2008): Ermittlung von Optimalgehalten an organischer Substanz landwirtschaftlich genutzter Böden nach § 17 (2) Nr. 7 BBodSchG. Publikationen des Umweltbundesamtes (Hrsg.).
- Westerhuis, W., Amaducci, S., Struik, P. C., Zatta, A., van Dam, J. E. G., Stomph, T. J. (2009a): Sowing density and harvest time affect fibre content in hemp (*Cannabis sativa*) through their effects on stem weight. *Annals of Applied Biology* 155, 225-244.
- Westerhuis, W., Pahkala, K., Struik, P.C., Van Dam, J.E.G., Stomph, T.J. (2009b): Site does not affect the fibre content ranking order among fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) varieties. *Pflanzenbauwissenschaften* 13(2), 60-71.
- Wichtmann, W., Dannowski, R. (2003): Abschätzung der Änderung der Grundwasserneubildung bei Aufgabe der ackerbaulichen Nutzung leichter Böden. In: Tagungsband der International Association for Landscape Ecology, Deutschland: Landnutzungswandel: Analyse – Bewertung – Planung – Management. Eberswalde, 50-51.
- Wong, M.F., Van der Kruijs, A.C.B.M., Juo, A.S.R. (1992): Leaching loss of calcium, magnesium, potassium and nitrate derived from soil, lime and fertilizers as influenced by urea applied to undisturbed lysimeters in south-east Nigeria. *Fertilizer Research* 31, 281-289.
- Wulff, F. (1996): Umweltschonende Kalium- und Phosphatdüngung. Feldversuche, Bodenanalysen und Modellrechnungen zur Bestimmung des Düngerbedarfs von Ackerkulturen auf Sandböden. Doktorarbeit. Universität Göttingen.
- Wulff, F., Schulz, V., Jungk, A., Claasen, N. (1998): Potassium fertilization on sandy soils in relation to soil tests, crop yield and K-leaching. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 161, 591-599.
- Yano, Y., McDonald, W.H., Aber, J.D. (2000): Biodegradable dissolved organic carbon in forest soil solution and effects of chronic nitrogen deposition. *Soil Biology and Biochemistry* 32, 1743-1751.

- Yara, GmbH (2008): Hühnertrockenkot – Optimaler Dünger für die Zuckerrübe. Incona, effizient düngen. Incona, Newsletter 35, Dülmen. Online: [http://www.effizientduengen.de/download/Newsletter\\_35.pdf](http://www.effizientduengen.de/download/Newsletter_35.pdf) (Abrufdatum: 16.01.2018).
- Zhang, T. Q., MacKenzie, A. F., Liang, B. C. (2004): Nitrate leaching from residual fertilizer N after spring thaw in two corn agro-ecosystems. *Canadian Journal of Soil Science* 84, 477-480.
- Zhang, H., Huang, Y., Ye, X., Xu, F. (2011): Genotypic variation in phosphorus acquisition from sparingly soluble P sources is related to root morphology and root exudates in *Brassica napus*. *Science China Life Science* 54, 1134-1142.
- Zhou, Y., Wang, S. Lou, H., Fan, P. (2018): Chemical constituents of hemp (*Cannabis sativa* L.) seed with potential anti-neuroinflammatory activity. *Phytochemistry Letters* 23, 57-61.
- Zöphel, B., Kreuter, T., Männicke, S., Schulz, J. (2001b): Nachwachsende Rohstoffe (Hanf, Flachs, Salbei und Kamille) – Anbau und Bedeutung für den Lebensraum Acker in Sachsen. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden (Hrsg.) Online: [https://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/download/Nachwachsende\\_Rohstoffe.pdf](https://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/download/Nachwachsende_Rohstoffe.pdf) (Abrufdatum: 10.04.2018).
- Zöphel, B., Kreuter, T., Stark, A., Volkmar, C. (2001a): Auswirkungen des Anbaus von Hanf auf die Begleitvegetation und ausgewählte Arthropodengruppen. *Peckiana* 1, 127-134.
- Zsolnay, A., Görlitz, H. (1994): Water extractable organic matter in arable soils: effect of drought and long-term fertilization. *Soil Biology and Biochemistry* 26(9), 1257-1261.

## Anhang

### Inhaltsverzeichnis

A 1:	Verwendungsmöglichkeiten von Hanf .....	184
A 2:	Definition der Bodengehaltsklassen .....	185
A 3:	Phosphorrichtwerte der GK C der einzelnen Bundesländer .....	185
A 4:	Gehaltsklasse für Phosphor .....	186
A 5:	Neue Richtwerte für Phosphorgehalte im Boden .....	186
A 6:	Gehaltsklassen für Kalium .....	186
A 7:	Klimadiagramm des langjährigen Mittels 1981-2010 der Wetterstation Waren... ..	187
A 8:	Klimadiagramm des langjährigen Mittels 1981-2010 der Wetterstationen Bielefeld- Deppendorf/Versmold .....	187
A 9:	Geländeformblatt Lärz.....	188
A 10:	Geländeformblatt Versmold 1 .....	189
A 11:	Geländeformblatt Versmold 2 .....	190
A 12:	Bodenkennwerte der Bodenprofile.....	191
A 13:	Nährstoffgehalte verschiedener Wirtschaftsdünger .....	192
A 14:	Signifikanzniveaus der statistischen Analyse zwischen Temperaturen und Niederschlägen der Standorte Lärz und Versmold.....	192
A 15:	Box-Whisker-Plot zur täglichen Niederschlagsverteilung, .....	193
A 16:	Verlauf der Temperatursummen während der Hauptwachstumsphase von der Aussaat bis Ende September, Winteranbau 2013/14.....	193
A 17:	Wassergehalte der nutzbaren Feldkapazität .....	194
A 18:	Signifikanzniveaus der statistischen Auswertung der Wassergehalte, Winteranbau 2013/14 .....	195
A 19:	Nitrat-Stickstoffgehalte der beiden Aussaatstärken, Winteranbau 2013/14.....	195
A 20:	Signifikanzniveaus der statistischen Auswertung, Nährstoffe, Winteranbau 2013/14 .....	196
A 21:	Phosphorgehalte im Boden der beiden Aussaatstärken, Winteranbau 2013/14....	196
A 22:	Kaliumgehalte der beiden Aussaatstärken, Winteranbau 2013/14.....	197
A 23:	Heißwasserextrahierbarer Kohlenstoff der beiden Aussaatstärken, Winteranbau 2013/14 .....	197

A 24: Vergleich der Gehalte an heißwasserextrahierbarem und organischem Kohlenstoff der Versuchsstandorte zur Aussaat, Winteranbau 2013/14.....	198
A 25: Verhältnis von heißwasserextrahierbaren zu organischem Kohlenstoff zur Aussaat, Winteranbau 2013/14 .....	198
A 26: Heißwasserextrahierbarer Stickstoff der beiden Aussaatstärken, Winteranbau 2013/14 .....	199
A 27: Verhältnis von heißwasserextrahierbaren Stickstoff zu Gesamt-Stickstoff zur Aussaat, Winteranbau 2013/14.....	199
A 28: Vergleich der Gehalte an heißwasserextrahierbaren und Gesamtstickstoff der Versuchsstandorte zur Aussaat, Winteranbau 2013/14.....	200
A 29: Tageslänge der Standorte Lärz und Vermold.....	200
A 30: Pflanzhöhen der verschiedenen Beprobungen, Winteranbau 2013/14 .....	200
A 31: Signifikanzniveaus der statistischen Auswertung der Pflanzenbonituren, Winteranbau 2013/14 .....	201
A 32: Stängeldurchmesser der verschiedenen Beprobungen, Winteranbau 2013/14.....	201
A 33: Wurzellängen der verschiedenen Beprobungen, Winteranbau 2013/14.....	201
A 34: Ausdünnungsrate zur Beprobung zur Blüte, Winteranbau 2013/14 .....	201
A 35: Pflanzenzahl pro Quadratmeter zur Ernte, Winteranbau 2013/14.....	202
A 36: Errechnete Hektarerträge aus den Quadratmeterernten, Winteranbau 2013/14 ....	202
A 37: Gewichtsanteile der einzelnen Pflanzenteile am Gesamtpflanzengewicht, Probennahme zur Blüte, Winteranbau 2013/14 .....	203
A 38: Stickstoffgehalte der Pflanzenteile zu den verschiedenen Beprobungen, Winteranbau 2013/14 .....	204
A 39: Phosphorgehalte der Pflanzenteile zu den verschiedenen Beprobungen, Winteranbau 2013/14 .....	205
A 40: Kaliumgehalte der Pflanzenteile zu den verschiedenen Beprobungen, Winteranbau 2013/14.....	206
A 41: Statistische Auswertung der Faserqualität, Winteranbau 2013/14 .....	207
A 42: Vergleich der Zugfestigkeiten der Halbzeuge aus Flachs (Fl) und Hanf des Winteranbaus 2013/14 (Ha), Polyvlies GmbH.....	207
A 43: Vergleich der Dehnung der Halbzeuge aus Flachs (Fl) und Hanf des Winteranbaus 2013/14 (Ha), Polyvlies GmbH.....	208

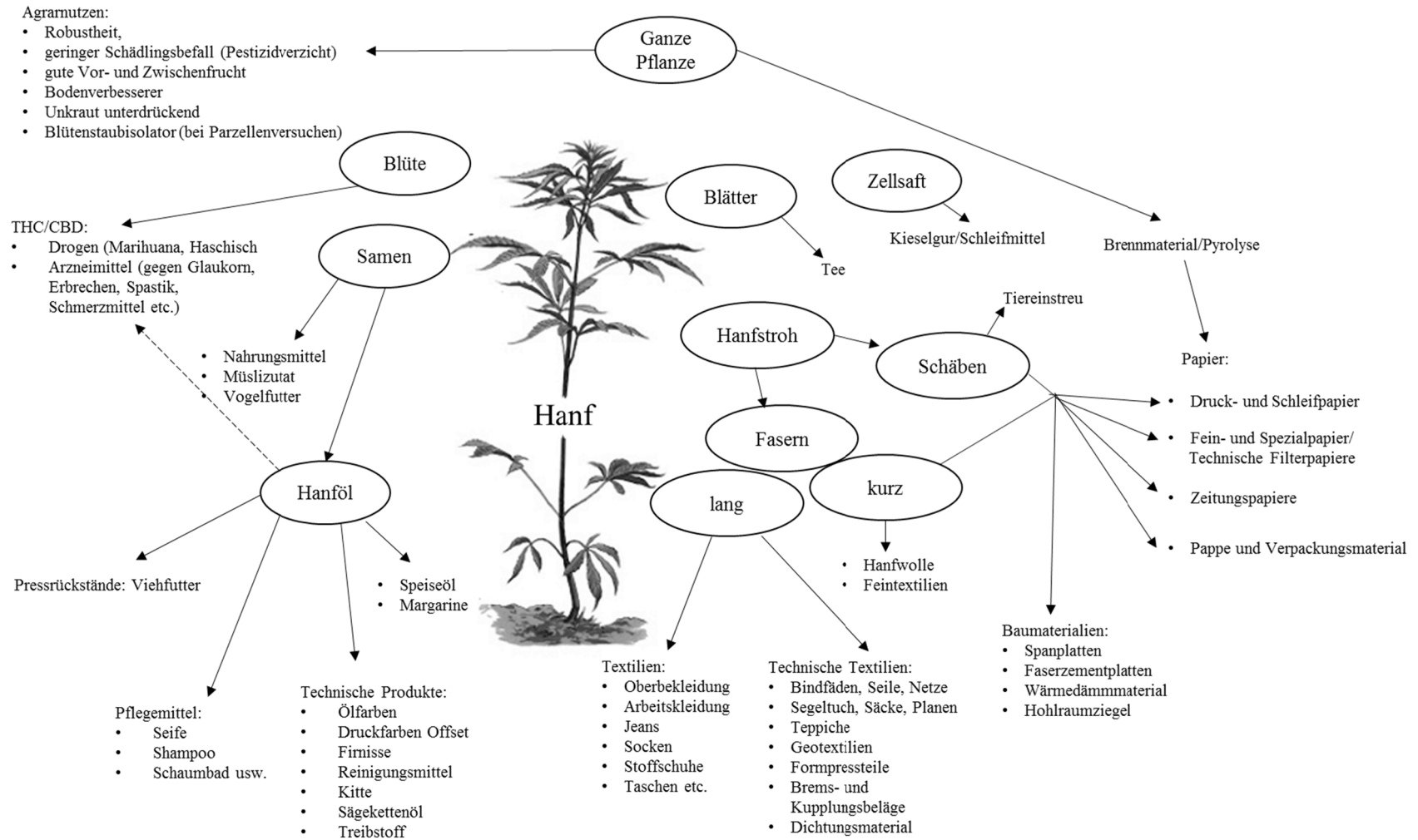
---

A 44: Vergleich der Biegespannung der Formpressteile mit Flachs (Fl) und Hanf des Winteranbaus 2013/14 (Ha), Polyvlies GmbH .....	208
A 45: Vergleich des Biege-E-Moduls der Formpressteile mit Flachs (Fl) und Hanf des Winteranbaus 2013/14 (Ha), Polyvlies GmbH .....	208
A 46: Vergleich der Schlagzähigkeit der Formpressteile mit Flachs (Fl) und Hanf aus dem Winteranbau 2013/14 (Ha), Polyvlies GmbH.....	209
A 47: Signifikanzniveaus der Temperaturen und Niederschläge zwischen den Standorten, Sommeranbau 2014.....	209
A 48: Niederschlagsmengen zur Aussaat, Sommeranbau 2014.....	209
A 49: Box-Whisker-Plot der täglichen Niederschlagsmengen, Sommeranbau 2014.....	210
A 50: Temperatursummen, Sommeranbau 2014.....	210
A 51: Nitratstickstoffgehalte im Boden, Sommeranbau 2014.....	211
A 52: Phosphorgehalte im Boden, Sommeranbau 2014.....	211
A 53: Kaliumgehalte im Boden, Sommeranbau 2014.....	211
A 54: Gehalte an heißwasserextrahierbarem Kohlenstoff und Stickstoff, Sommeranbau 2014.....	212
A 55: Ergebnisse der statistischen Auswertung der Bodennährstoffe, Sommeranbau 2014 .....	212
A 56: Statistische Auswertung der Faserqualität, Sommeranbau 2014 .....	212
A 57: Box-Whisker-Plot der Faserbreite (a), der Zugfestigkeit (b), des Zugmoduls (c) und der Bruchdehnung (d), Sommeranbau 2014 .....	213
A 58: Statistische Auswertung Vergleich Winteranbau 2013/14 und Sommeranbau 2014 .....	214
A 59: Ergebnisse der statistischen Auswertung Wettervergleich, Lysimeter .....	215
A 60: Wasserverfügbarkeit nach Heyland (1991) für die gesamte Anbauzeit auf den Lysimetern .....	215
A 61: Ergebnisse der statistischen Analyse Pflanzenbonituren Lysimeter .....	216
A 62: Nährstoffgehalte der Pflanzenteile auf den Lysimetern, Sommeranbau 2014.....	216
A 63: Korrelation zwischen Niederschlags- und Sickerwassermenge .....	216
A 64: Anzahl der sickerwasserführenden Monate über den Gesamtanbauzeitraum.....	217
A 65: Korrelationskoeffizienten der Nährstoffkonzentrationen des Lysimeter- Experimentes.....	217

---

A 66: Korrelationskoeffizienten der Nährstoffgehalte des Lysimeter-Experimentes .....	218
A 67: Signifikanzniveaus der Nährstoffkonzentrationen und -gehalte des Lysimeterversuches .....	219
A 68: Niederschläge und Sickerwassermengen, Lysimeter Integrierter Landbau.....	220
A 69: Nährstoffkonzentrationen des Sickerwassers Integrierter Landbau .....	221
A 70: Nährstoffausträge des Sickerwassers Integrierter Landbau.....	222
A 71: Nährstoffausträge nach Anbauzeit.....	223
A 72: Faserkennwerte des Einfrierversuches .....	224
A 73: Signifikanzniveaus der Faserkennwerte, Einfrierversuch .....	224
A 74: Beginnende Samenreife am Standort Lärz und am Standort Versmold .....	225
A 75: Froströste, Winteranbau 2013/14.....	225
A 76: Mähen des Hanfstroh im Frühjahr .....	226
A 77: Gepresste Hanfstrohballen im Frühjahr.....	226

**Anhang 1: Verwendungsmöglichkeiten von Hanf**





**Anhang 2: Definition der Bodengehaltssklassen, verändert nach VDLUFA 1997**

Gehaltsklasse	Düngeempfehlung
A sehr niedrig	stark erhöhte Düngung gegenüber der Empfehlung in GK C Düngewirkung auf Ertrag: hoher Mehrertrag auf Boden: Gehalt im Boden steigt deutlich an
B niedrig	erhöhte Düngung gegenüber der Empfehlung in GK C Düngewirkung auf Ertrag: mittlerer Mehrertrag auf Boden: Gehalt im Boden steigt an
<b>C anzustreben</b>	<b>Erhaltungsdüngung in der Regel nach Nährstoff-Abfuhr</b> Düngewirkung auf Ertrag: geringer Mehrertrag auf Boden: Gehalt im Boden bleibt erhalten
D hoch	reduzierte Düngung gegenüber der Empfehlung in GK C Düngewirkung auf Ertrag: Mehrertrag meist nur bei Blattfrüchten auf Boden: Gehalt im Boden nimmt langsam ab
E sehr hoch	keine Düngung Düngewirkung auf Ertrag: keine auf Boden: Gehalt im Boden nimmt ab

**Anhang 3: Phosphorrichtwerte der GK C der einzelnen Bundesländer***Derzeitige Richtwerte für Phosphor in der GK C [mg P/100 g Boden]*

VDLUFA (Standpunkt 1997)	4,5 – 9,0
Bayern, Baden-Württemberg, Hessen	4,4 – 8,7
Brandenburg	4,5 – 6,4
Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen	5,0 – 10,0
Nordrhein-Westfalen	4,4 – 7,9
Rheinland-Pfalz	5,2 – 8,7
Sachsen	5,5 – 8,0
Sachsen-Anhalt, Thüringen	4,9 – 7,2
Schleswig-Holstein	7,4 – 14,0

Verändert nach Steffens *et al.* 2009

**Anhang 4: Gehaltsklasse für Phosphor, verändert nach VDLUFA (1997)**

<i>Gehaltsklassen für Phosphor</i>							
Humus	Ton	Bodenart	A	B	C	D	E
[%]	[%]		mg P/100 g Boden				
0-8	-5	Sand	-2	3 - 5	6 - 10	11 - 17	18 - 35
	>5	IS - T	-2	3 - 4	5 - 9	10 - 15	16 - 33

**Anhang 5: Neue Richtwerte für Phosphorgehalte im Boden, verändert nach Arden (2018)**

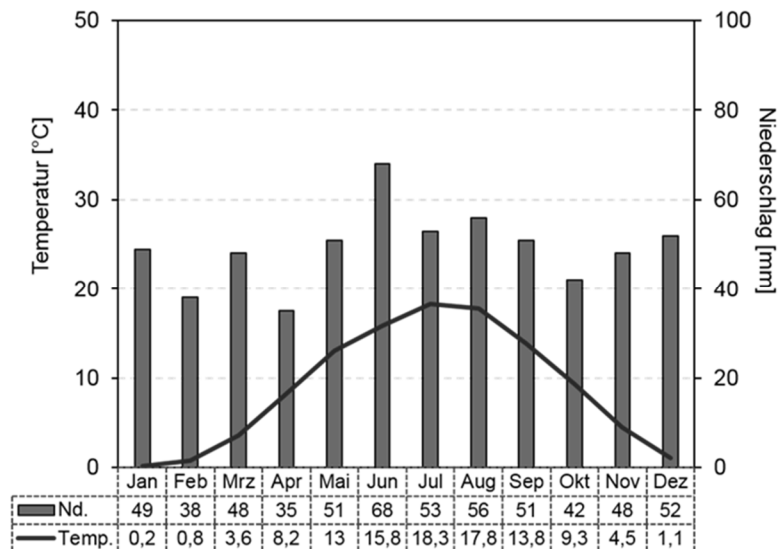
<i>Gehaltsklassen</i>	<i>bisherige Richtwerte</i>	<i>neue Richtwerte</i>
	<i>mg P/100 g Boden</i>	
A	≤ 2,0	≤ 1,5
B	2,1 - 4,4	1,6 - 3,0
C	4,5 - 9,0	3,1 - 6,0*
D	9,1 - 15,0	6,1 - 12,0
E	> 15,1	> 12,1

\* der Maximalwert von 6 mg-P gilt für alle Standorte mit Niederschlagsmengen > ~550 mm/Jahr. In Trockengebieten (< ~550 mm) erhöht sich der Maximalwert

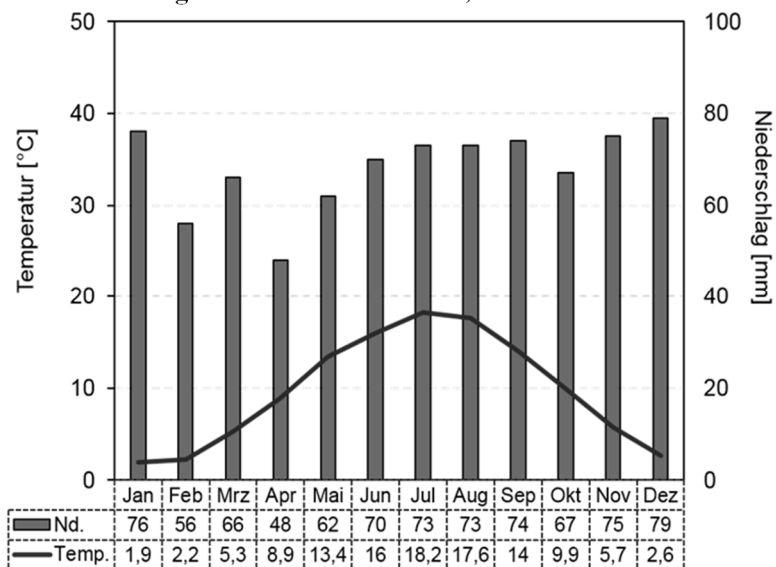
**Anhang 6: Gehaltsklassen für Kalium, verändert nach Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2018)**

<i>Gehaltsklassen für Kalium</i>							
Humus	Ton	Bodenarten-Gruppe	A	B	C	D	E
[%]	[%]		mg K/100 g Boden				
0-8	0 – 5,0	ls, ss, us	- 2	3 - 5	5 - 8	11 - 17	18 - 35
	5,1 – 12,0	ls, us	- 3	3 - 4	8 - 12	10 - 15	16 - 33
	12,1 – 35,0	ll, sl, su, tl, tu,	- 5	6 - 10	11 - 16	17 - 29	30 - 70
	>35,1	lt, ut	- 7	8 - 14	14 - 21	22- 33	34 - 80

**Anhang 7: Klimadiagramm des langjährigen Mittels 1981-2010 der Wetterstation Waren, verändert nach DWD**



**Anhang 8: Klimadiagramm des langjährigen Mittels 1981-2010 mit Temperaturdaten der Wetterstation Bielefeld-Deppendorf, sowie Niederschlagswerte der Regenmesstation Versmold, verändert nach DWD**





### Anhang 10: Geländeformblatt Versmold 1

Versmold 1 Normkolluvisol aus flach gekipptem Schlufflehm über Normallehm über Normgley aus glazigenem Sand

Titeldaten																		
TK-Nr.	Projekt-Nr.	Profil-Nr.	Datum der Aufnahme			Bearbeiter	Rechtswert/ Länge	Hochwert/ Breite	Höhe über NN	Aufschlussart/Intensität	Bemerkungen							
			Jahr	Monat	Tag													
1	2	3	2013	9	18	S.Richter	8° 13,842' O	52° 3,391' N	123 m	GS N,P	10							
Aufnahmesituation																		
Relief							Boden- abtrag/- auftrag	Nutz- ungsart	Vege- tation	Witter- ung	Anthrop. Veränderungen/ bautechn. Maßnahmen	Boden- orga- nismen	Bemerkungen					
Neigung	Expo- sition	Wölbung	Relief- formtyp	metr. Angaben	Mikro- relief	Lage im Relief												
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24					
O	SW						-	Acker	Hanf	bewölkt	D, M Bodenauftrag							
Horizontbezogene Daten I																		
Lfd. Nr.	Horizontgrenzen		Horizont- symbol	Boden- farbe	Humus- gehalt	Pedogene Merkmale										Lagerungs- dichte/Subs- tanz- vol./Zers.- stufe	Durch- wurzelungs- intensität	
	Unter-/ Ober- grenze (cm)	Form, Schärfe u. Lage				Hydromorphie- merkmale	Boden- feuchte	Konsis- tenz	sonstige pedog. Merk- male	Bodengefüge		Hohlräume			Fein- wurzeln		Grob- wurzeln	
										oxidativ	reduktiv	Form/G röße	Lager- ungsart	Risse				Poren
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41a	41b	
1	0-30	e	jAp	2,5Y 3/3	h3	-	-	feu2	ko2	2% Steine	kru/sub gre2	h	Ri,f3, gri4	Pa,f3, gri3	Rwu,Rre	Ld2	Wf3	Wg1
2	30-47	e	jAh-M	2,5Y 3/2	h2	-	-	feu2	ko2	2% Steine	sub gre4	h	Ri,f2, gri3	Pa,f3, gri3	Rwu,Rre	Ld3	Wf1	Wg0
3	47-66	e	llrAh	2,5Y 3/2	h3	-	-	feu2	ko2	1% Steine	sub gre3	h	Ri,f2, gri2	Pa,f3, gri2	Rwu,Rre	Ld2	Wf1	Wg0
4	66-106	z	llrAh+Go	2,5Y 4/4	h3-h0	eh, eo, es	-	feu2	ko2	1% Steine	kru/kit gre2	g	Ri,f2, gri2	Pa,f2, gri2	Rwu	Ld3	Wf0	Wg0
5	106-126	z	llGr-Go	10YR 4/6	h0	eh, eo	rb	feu2	ko2	Organik in Wurzelg.	kit gre4	g	Ri,f2, gri2	Pa,f2, gri2	Rwu	Ld3	Wf0	Wg0
6	126-+150		lllGo-Gr	10YR 5/4	h0	eh, es	rb	feu2	ko2	Organik in Wurzelg. 1% Steine	kit/ein gre4	g	Ri,f2, gri2	Pa,f2, gri2	Rwu	Ld3	Wf0	Wg0

## Anhang 11: Geländeformblatt Vermold 2

Vermold 2 Plaggenesch-Gley aus organogenem Lehmsand über flachem organogenem Schluffsand über glazigenem Lehmsand

Titeldaten																		
TK-Nr.	Projekt-Nr.	Profil-Nr.	Datum der Aufnahme			Bearbeiter	Rechtswert/ Länge	Hochwert/ Breite	Höhe über NN	Aufschlussart/Intensität	Bemerkungen							
			Jahr	Monat	Tag													
1	2	3	2013	9	18	S.Richter	6	7	8	9	10							
		2	2013	9	18	S.Richter				GS N,P								
Aufnahmesituation																		
Relief							Boden- abtrag/ auftrag	Nutz- ungsart	Vege- tation	Witter- ung	Anthrop. Veränderungen/ bautechn. Maßnahmen	Boden- orga- nismen	Bemerkungen					
Neigung	Exposi- tion	Wölbung	Relief- formtyp	metr. Angaben	Mikro- relief	Lage im Relief												
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24					
							-	Acker	Mais	bewölkt								
Horizontbezogene Daten I																		
Lfd. Nr.	Horizontgrenzen		Horizont- symbol	Boden- farbe	Humus- gehalt	Pedogene Merkmale									Lagerungs- dichte/Subs- tanz- vol./Zers.- stufe	Durch- wurzelungs- intensität		
	Unter-/ Ober- grenze (cm)	Form, Schärfe u. Lage				Hydromorphie- merkmale		Boden- feuchte	Konsis- tenz	sonstige pedog. Merk- male	Bodengefüge		Hohlräume					
						oxidativ	reduktiv				Form/G röße	Lager- ungsart	Risse	Poren		Röhren u. Gänge	Fein- wurzeln	Grob- wurzeln
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41a	41b	
1	0-35	e,di	Ap/E	2,5Y 3/2	h3	-	-	feu2	ko2	<1% Steine	kru gre2	-	Ri,f2, gri4	Pa,f3, gri3	Rwu, Rre	Ld1	Wf4	Wg0
2	35-50	f	E-Go	10YR 3/4	h2	eh	-	feu2	ko2	<1% Steine	kru/ein gre2	-	Ri,f3 gri3	Pa,f3, gri2	Rwu, Rre	Ld1	Wf3	Wg1
3	50-70	w	Go	10YR 4/3	h3	eh, eo, ed, es	-	feu2	-	<1% Steine	ein/kit gre2	-	Ri,f2 gri2	-	Rwu	Ld2	Wf0	Wg1
4	70-94	w	IIGo-Gr	10YR 4/6	h3-h0	eh	rb, rg	feu4	-	<1% Steine Tonbänder Organik	ein gre2	-	Ri,f3 gri3	Pa,f2, gri2	Rwu	Ld2	Wf0	Wg0
5	94-125	w	IIGr	10YR 5/4	h0	eh	rg	feu5	-	<1% Steine dunkle Warven	ein gre2	-	Ri,f2 gri2	-	Rwu	Ld2	Wf0	Wg0
6	+130																	
											Grundwasser							

**Anhang 12: Bodenkennwerte der Bodenprofile**

<i>Standort</i>	<i>Horizont- bezeichnung</i>	<i>Bodentiefe [cm]</i>	<i>Bodenart</i>	<i>Mg</i>	<i>Ca</i>	<i>Fe</i>	<i>Al</i>
				<i>[mg/100 g Boden]</i>			
Lärz	Ap	0-37	St2	47,1	144,8	475,1	320,8
	Ah + Bv	37-52	Sl2	61,3	105,0	595,0	367,5
	ilCv	52-65	Sl2	53,9	73,1	356,6	360,3
	Go	65-105+	Sl2	49,7	61,0	304,2	547,9
Versmold 1	jAp	0-30	Lt2	193,4	261,6	1885,6	1243,2
	jAh-M	30-47	Ls3	186,7	148,3	1628,8	1126,4
	II rAh	47-66	Ls4	146,2	180,8	1441,6	1025,5
	II rAh + Go	66-106	Slu	123,3	112,6	1280,5	1081,5
	II Gr-Go	106-126	St3	202,5	92,1	1775,0	1209,1
	III Go-Gr	126-150+	St3	183,6	87,4	1771,0	1020,6
Versmold 2	Ap/E	0-35	Sl2	58,1	130,5	659,0	989,6
	E-Go	35-50	Sl2	62,8	103,5	734,0	1314,1
	Go	50-70	Su3	54,5	60,1	567,2	750,3
	II Go-Gr	70-94	St2	49,1	75,0	467,0	339,4
	II Gr	94-125+	St2	25,6	30,2	198,8	149,6

**Anhang 13: Nährstoffgehalte verschiedener Wirtschaftsdünger, verändert nach LWK NRW, 2014**

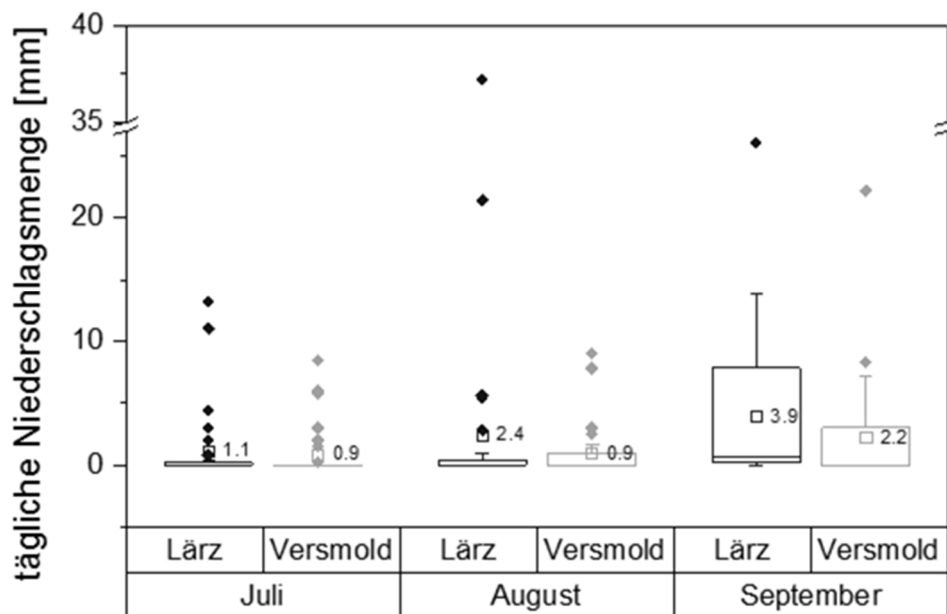
	<i>TS</i>	<i>Gesamt-N</i>	<i>davon NH<sub>4</sub>-N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>MgO</i>	<i>CaO</i>
<i>Dünger</i>	<i>[%]</i>			<i>Gehalte in kg/t</i>			
Ringermist	23	5,6		1,3	8,0	1,7	
Putenmist	50	19,1		7,9	13,6	6,2	19,7
Hühnertrockenkot	50	25,5	9,9	8,8	14,5	7,9	50,6
	<i>[%]</i>			<i>Gehalte in kg/m<sup>3</sup></i>			
Rindergülle	6	3,2	1,9	0,6	1,2	0,9	
Rindergülle	8	3,9	2,2	0,7	1,4	1,0	
Rindergülle	10	4,5	2,4	0,9	1,7	1,3	

**Anhang 14: Signifikanzniveaus der statistischen Analyse zwischen Temperaturen und Niederschlägen der Standorte Lärz und Versmold**

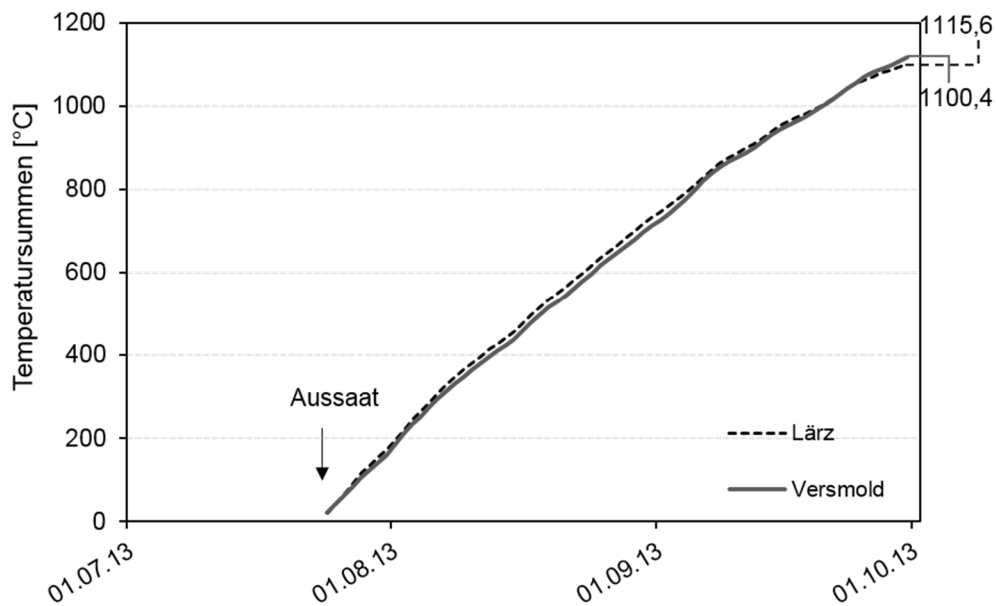
	<i>Monatsmitteltemperatur</i>	<i>Monatsniederschlags- summe</i>	<i>n</i>
langjähriges Mittel (1981-2010)	0,771	< 0,001	12
	<i>Tagesmitteltemperatur<sup>(x)</sup></i>	<i>Tagesniederschlags- summe<sup>(x)</sup></i>	
gesamter Zeitraum (Juli-März)	0,015	0,155	274
Wachstumszeit (Aussaat bis Ende September)	0,826	0,104	69
Juli	0,143	0,485	31
August	0,668	0,849	31
September	0,258	0,049	30
Oktober	0,125	0,280	31
November	0,191	0,958	30
Dezember	0,024	0,700	31
Januar	0,004	0,197	31
Februar	0,001	0,928	28
März	0,085	0,089	31
	<i>Monatsmitteltemperatur<sup>(x)</sup></i>	<i>Monatsniederschlags- summe</i>	
Lärz langjähriges Mittel - Wetter Winteranbau (Juli-März)	0,666	0,484	9
Versmold langjähriges Mittel - Wetter Winteranbau (Juli-März)	0,436	0,001	9
Lärz langjähriges Mittel - Wetter Winteranbau (Juli-Oktober)	0,996	0,100	4
Versmold langjähriges Mittel - Wetter Winteranbau (Juli-Oktober)	0,886	0,045	4
	<i>Temperatursummen<sup>(x)</sup></i>	<i>Niederschlagssummen<sup>(x)</sup></i>	
Aussaat bis Ende September	0,846	< 0,001	69
		<i>Anzahl Regentage</i>	
Juli-März		0,077	9



Anhang 15: Box-Whisker-Plot zur täglichen Niederschlagsverteilung, Winteranbau 2013/14



Anhang 16: Verlauf der Temperatursummen während der Hauptwachstumsphase von der Aussaat bis Ende September, Winteranbau 2013/14



Anhang 17: Wassergehalte der nutzbaren Feldkapazität (Bodenkundliche Kartieranleitung, Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005)

Bodenart	Luftkapazität Poren > 50 µm (pF < 1,8) <sup>1)</sup>			nutzbare Feldkapazität Poren 0,2 bis 50 µm (pF 4,2 bis 1,8) <sup>1)</sup>			Feldkapazität Poren ≤ 50 µm (pF ≥ 1,8) <sup>1)</sup>			Totwasser Poren ≤ 0,2 µm (pF ≥ 4,2)		
	Kurzzeichen	pt1+2	pt3	pt4+5	pt1+2	pt3	pt4+5	pt1+2	pt3	pt4+5	pt1+2	pt3
Ss <sup>1)</sup>	36	32	27	9	7	7	14	11	10	5	4	3
SI2	23	18	13	20	18	17	28	25	23	8	7	6
SI3	18	15	10	22	18	17	34	27	25	12	9	8
SI4	18	12	8	22	18	15	36	30	26	14	12	11
Slu	14	10	7	23	21	19	38	33	30	15	12	11
St2	24	20	15	18	16	13	26	22	18	8	6	5
St3	18	14	9	18	15	12	35	30	26	17	15	14
Su2	24	21	15	20	18	17	26	23	21	6	5	4
Su3	17	14	10	25	21	20	35	29	26	10	8	6
Su4	14	11	8	27	23	21	39	32	28	12	9	7
Ls2	13	9	6	21	16	14	40	34	31	19	18	17
Ls3	15	9	6	21	16	14	39	33	30	18	17	16
Ls4	15	11	7	20	16	13	39	32	28	19	16	15
Lt2	11	7	5	18	14	11	42	36	32	24	22	21
Lt3	8	5	3	17	12	10	45	39	35	28	27	25
Lts	10	6	5	17	14	11	44	37	31	27	23	20
Lu	12	7	4	21	17	15	41	36	33	20	19	18
Uu	10	7	3	30	26	23	43	38	35	13	12	12
Uls	13	8	5	24	22	21	39	35	33	15	13	12
Us	11	9	4	28	25	22	41	35	32	13	10	10
Ut2	10	6	3	28	26	23	40	37	35	12	11	12
Ut3	11	6	3	26	25	23	39	37	35	13	12	12
Ut4	12	7	3	23	21	19	39	37	35	16	16	16
Tt	4	3	2	15	13	12	51	43	35	36	30	23
Tl	5	4	3	15	13	11	48	41	35	33	28	24
Tu2	5	4	3	16	12	10	47	42	36	31	30	26
Tu3	8	6	3	17	13	10	45	38	35	28	25	25
Tu4	10	6	3	19	17	16	41	37	35	22	20	19
Ts2	5	4	3	16	13	12	47	39	34	31	26	22
Ts3	7	6	5	16	13	11	45	37	32	29	24	21
Ts4	13	10	6	17	14	11	43	32	30	26	18	19
Sande <sup>1)</sup>												
fS, fSms, fSgs	34	31	23	10	9	8	16	14	12	6	5	4
mS, mSfs, mSgs	36	32	26	9	6	5	14	10	8	5	4	3
gS	38	33	29	8	5	4	12	8	6	4	3	2

Gesamtporenvolumen = Luftkapazität + Feldkapazität (in Volumen-%)  
 Totwasser = Feldkapazität – nutzbare Feldkapazität (in Volumen-%)  
*kursive Zahlen* = interpolierte Werte; <sup>1)</sup> = untere pF-Grenzen bei Reinsanden < 2,5

**Anhang 18: Signifikanzniveaus der statistischen Auswertung der Wassergehalte, Winteranbau 2013/14**

<i>Wassergehalt</i>	<i>L, 25- L, 50</i>	<i>VI, 25-VI, 50</i>	<i>V2, 25 - V2, 50</i>	<i>L, 25-VI, 25</i>	<i>L, 25 -V2, 25</i>	<i>VI,25-V2 25</i>	<i>L50- VI, 50</i>	<i>L50 -V2 50</i>	<i>VI, 50- V2, 50</i>	<i>n</i>
0-30 cm, alle Beprobungen	0,481	0,206	0,504	0,019	0,579	0,005	0,012	0,478	0,175	6
30-60 cm, alle Beprobungen <sup>(x)</sup>	0,240	0,699	0,394	0,123	0,015	0,003	0,310	0,818	0,240	6
60-90 cm, alle Beprobungen <sup>(x)</sup>	0,589	0,818	0,394	≤ 0,001	≤ 0,001	0,720	0,041	0,589	1,000	6

**Anhang 19: Nitrat-Stickstoffgehalte der beiden Aussaatstärken, Winteranbau 2013/14**

<i>Standort</i>	<i>Boden- tiefe</i>	<i>Aussaat</i>	<i>Blühende</i>	<i>Wachstums- ende</i>	<i>nach Frost</i>	<i>Ernte</i>
	<i>[cm]</i>			<i>kg NO<sub>3</sub>-N/ha</i>		
<b>Aussaatstärke 25 kg/ha</b>						
Lärz	0-30	61,3	33,0	50,7	72,6	45,7
	30-60	11,0	3,8	12,6	15,1	22,8
	60-90	0,5	4,2	20,2	38,5	4,4
Versmold 1	0-30	231,3	45,0	32,4	88,3	34,4
	30-60	57,8	53,1	18,9	48,6	43,4
	60-90	31,8	17,0	43,5	27,6	11,2
Versmold 2	0-30	109,8	74,3	80,8	76,9	17,5
	30-60	31,3	33,2	36,7	100,0	12,2
	60-90	13,9	0,6	1,7	33,6	21,4
<b>Aussaatstärke 50 kg/ha</b>						
Lärz	0-30	61,4	n.b.	19,1	n.b.	55,9
	30-60	11,0	n.b.	0,0	n.b.	7,0
	60-90	0,5	n.b.	0,00	n.b.	10,5
Versmold 1	0-30	231,3	n.b.	62,2	n.b.	33,9
	30-60	57,8	n.b.	68,3	n.b.	39,8
	60-90	31,8	n.b.	49,8	n.b.	28,5
Versmold 2	0-30	109,8	n.b.	57,3	n.b.	38,9
	30-60	31,3	n.b.	11,0	n.b.	23,7
	60-90	13,9	n.b.	1,7	n.b.	32,5

## Anhang 20: Signifikanzniveaus der statistischen Auswertung, Nährstoffe, Winteranbau 2013/14

	<i>L, 25- L, 50</i>	<i>VI, 25-VI, 50</i>	<i>V2, 25 - V2, 50</i>	<i>L, 25-VI, 25</i>	<i>L, 25 -V2, 25</i>	<i>VI, 25-V2 25</i>	<i>L50- VI, 50</i>	<i>L50 -V2 50</i>	<i>VI, 50- V2, 50</i>	<i>n</i>
Phosphor 0-30 cm	≤ 0,001	0,002	0,189	≤ 0,001	< 0,001	0,003	≤ 0,001	≤ 0,001	0,036	6
Kalium 0-30 cm <sup>(x)</sup>	0,428	0,056	0,093	≤ 0,001	0,853	≤ 0,001	0,002	0,147	0,002	6
C <sub>HWE</sub> 0-30 cm	0,425	0,521	0,940	0,176	0,486	0,042	0,302	0,171	0,032	9
C <sub>HWE</sub> 30-60 cm <sup>(x)</sup>	0,123	0,861	0,108	≤ 0,001	≤ 0,001	0,595	≤ 0,001	≤ 0,001	0,387	9
C <sub>HWE</sub> 60-90cm <sup>(x)</sup>	0,290	0,815	0,558	≤ 0,001	≤ 0,001	0,008	≤ 0,001	0,161	≤ 0,001	9
N <sub>HWE</sub> 0-30 cm <sup>(x)</sup>	0,263	0,379	0,640	0,023	0,683	≤ 0,001	1,000	0,063	0,019	9
N <sub>HWE</sub> 30-60 cm <sup>(x)</sup>	≤ 0,001	0,482	0,174	≤ 0,001	≤ 0,001	0,683	≤ 0,001	≤ 0,001	0,190	9
N <sub>HWE</sub> 60-90 cm <sup>(x)</sup>	0,519	0,041	0,155	≤ 0,001	≤ 0,001	≤ 0,001	≤ 0,001	0,014	≤ 0,001	9

## Anhang 21: Phosphorgehalte im Boden der beiden Aussaatstärken, Winteranbau 2013/14

<i>Standort</i>	<i>Boden- tiefe</i>	<i>Aussaat</i>	<i>Blühende</i>	<i>Wachstums- ende</i>	<i>nach Frost</i>	<i>Ernte</i>
	<i>[cm]</i>	<i>mg P/100 g Boden</i>				
<i>Aussaatstärke 25 kg/ha</i>						
Lärz	0-30	8,9	10,7	10,1	11,2	10,1
	30-60	1,4	0,7	3,0	1,5	0,8
	60-90	0,9	0,1	0,3	0,0	0,2
Versmold 1	0-30	15,0	13,4	13,6	13,3	14,3
	30-60	6,0	8,5	7,9	8,4	10,8
	60-90	1,6	3,7	4,2	2,6	3,8
Versmold 2	0-30	16,8	15,3	13,8	16,0	15,0
	30-60	6,7	7,8	6,5	8,2	7,0
	60-90	1,0	0,5	1,1	0,8	0,8
<i>Aussaatstärke 50 kg/ha</i>						
Lärz	0-30	8,9	n.b.	8,1	n.b.	6,3
	30-60	1,4	n.b.	3,0	n.b.	7,0
	60-90	0,9	n.b.	0,3	n.b.	0,6
Versmold 1	0-30	15,0	n.b.	18,2	n.b.	20,2
	30-60	6,0	n.b.	7,9	n.b.	13,7
	60-90	1,6	n.b.	4,2	n.b.	7,2
Versmold 2	0-30	16,8	n.b.	14,1	n.b.	12,5
	30-60	6,7	n.b.	6,5	n.b.	0,4
	60-90	1,0	n.b.	1,1	n.b.	0,8

**Anhang 22: Kaliumgehalte der beiden Aussaatstärken, Winteranbau 2013/14**

	<i>Boden- tiefe</i>	<i>Aussaat</i>	<i>Blüte</i>	<i>Wachstums- ende</i>	<i>nach Frost</i>	<i>Ernte</i>
	<i>[cm]</i>	<i>mg K/100 g Boden</i>				
<b>Aussaatstärke 25 kg/ha</b>						
Lärz	0-30	10,7	11,0	8,4	5,2	6,9
	30-60	5,0	4,7	5,0	13,6	1,4
	60-90	6,1	7,1	5,1	4,7	2,7
Versmold 1	0-30	23,6	20,4	19,5	17,5	16,3
	30-60	11,4	14,5	15,3	19,5	11,2
	60-90	9,5	9,7	13,3	15,7	6,3
Versmold 2	0-30	11,4	8,7	10,1	5,9	4,2
	30-60	10,9	10,3	9,6	8,0	2,4
	60-90	3,7	4,5	5,1	5,2	0,8
<b>Aussaatstärke 50 kg/ha</b>						
Lärz	0-30	10,7	n.b.	8,0	n.b.	3,7
	30-60	5,0	n.b.	13,6	n.b.	2,6
	60-90	6,1	n.b.	4,7	n.b.	1,1
Versmold 1	0-30	23,7	n.b.	23,5	n.b.	19,6
	30-60	11,4	n.b.	19,5	n.b.	14,7
	60-90	9,5	n.b.	15,7	n.b.	10,9
Versmold 2	0-30	11,4	n.b.	12,9	n.b.	7,4
	30-60	10,9	n.b.	8,0	n.b.	9,0
	60-90	3,7	n.b.	5,2	n.b.	0,7

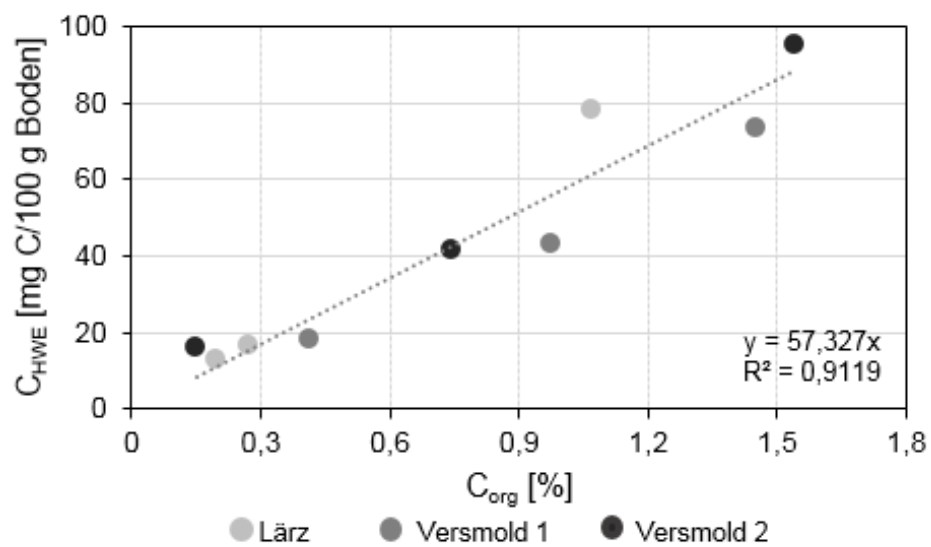
**Anhang 23: Heißwasserextrahierbarer Kohlenstoff der beiden Aussaatstärken, Winteranbau 2013/14**

	<i>Boden- tiefe</i>	<i>Aussaat</i>	<i>Blühende</i>	<i>Wachstums- ende</i>	<i>nach Frost</i>	<i>Ernte</i>
	<i>[cm]</i>	<i>C<sub>HWE</sub> mg/100 g Boden</i>				
<b>Aussaatstärke 25 kg/ha</b>						
Lärz	0-30	78,2	86,6	37,1	80,8	77,2
	30-60	16,6	15,4	27,0	26,9	24,3
	60-90	13,0	5,9	11,4	14,8	13,8
Versmold 1	0-30	73,2	71,2	42,3	64,9	70,3
	30-60	43,0	39,5	21,8	42,2	55,2
	60-90	18,4	29,9	11,0	36,7	35,5
Versmold 2	0-30	94,9	79,7	41,2	85,5	83,0
	30-60	41,7	44,3	22,9	48,2	41,0
	60-90	15,9	12,9	13,4	20,7	16,4
<b>Aussaatstärke 50 kg/ha</b>						
Lärz	0-30	78,2	n.b.	64,2	n.b.	53,8
	30-60	16,6	n.b.	19,3	n.b.	18,8
	60-90	13,0	n.b.	14,0	n.b.	13,6
Versmold 1	0-30	73,2	n.b.	41,1	n.b.	64,0
	30-60	43,0	n.b.	40,4	n.b.	43,4
	60-90	18,4	n.b.	34,2	n.b.	35,4
Versmold 2	0-30	94,9	n.b.	65,9	n.b.	71,8
	30-60	41,7	n.b.	41,3	n.b.	34,5
	60-90	15,9	n.b.	18,0	n.b.	11,6

**Anhang 24: Vergleich der Gehalte an heißwasserextrahierbarem und organischem Kohlenstoff der Versuchsstandorte zur Aussaat, Winteranbau 2013/14**

	<i>Bodentiefe</i> [cm]	$C_{HWE}$ [mg C/100 g Boden]	$C_{org}$	<i>Anteil <math>C_{HWE}</math> an <math>C_{org}</math></i> [%]
Lärz	0-30	78,2	1069	7,3
	30-60	16,6	270	6,2
	60-90	13,0	196	6,6
Versmold 1	0-30	73,2	1452	5,0
	30-60	43,0	975	4,4
	60-90	18,4	414	4,5
Versmold 2	0-30	94,9	1541	6,2
	30-60	41,7	741	5,6
	60-90	15,9	149	10,7

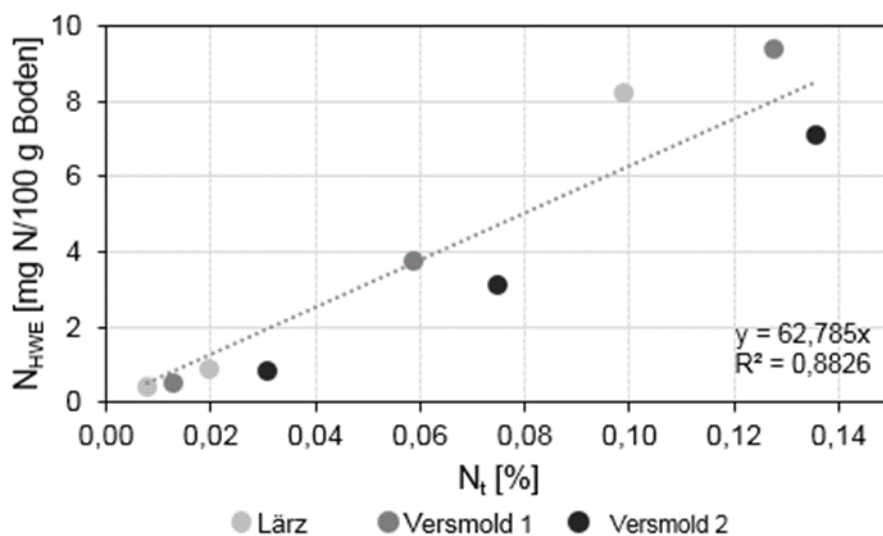
**Anhang 25: Verhältnis von heißwasserextrahierbaren zu organischem Kohlenstoff zur Aussaat, Winteranbau 2013/14**



## Anhang 26: Heißwasserextrahierbarer Stickstoff der beiden Aussaatstärken, Winteranbau 2013/14

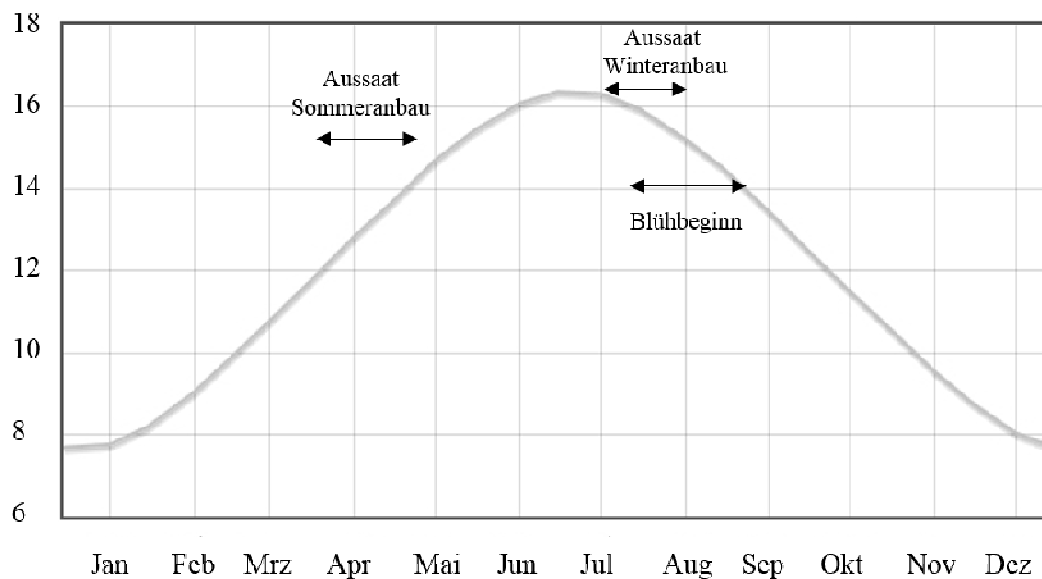
Standort	Bodentiefe [cm]	Aussaat	Blühende	Wachstums- ende	nach Frost	Ernte
<i>N<sub>HWE</sub> mg/100 g Boden</i>						
Aussaatstärke 25 kg/ha						
Lärz	0-30	8,2	10,5	5,8	7,9	9,7
	30-60	0,8	1,0	2,0	1,4	0,9
	60-90	0,4	0,2	0,2	0,2	0,1
Versmold 1	0-30	7,1	6,9	4,8	8,1	8,2
	30-60	3,1	3,7	3,5	4,1	5,9
	60-90	0,8	1,7	0,6	2,5	2,3
Versmold 2	0-30	9,4	7,8	7,1	9,1	9,0
	30-60	3,8	4,3	2,8	4,6	3,8
	60-90	0,5	0,6	0,6	0,8	0,5
Aussaatstärke 50 kg/ha						
Lärz	0-30	8,2	n.b.	7,8	n.b.	6,8
	30-60	0,8	n.b.	0,7	n.b.	0,6
	60-90	0,4	n.b.	0,3	n.b.	0,1
Versmold 1	0-30	7,1	n.b.	5,4	n.b.	7,9
	30-60	3,1	n.b.	4,6	n.b.	5,2
	60-90	0,8	n.b.	3,2	n.b.	3,2
Versmold 2	0-30	9,4	n.b.	8,4	n.b.	8,8
	30-60	3,8	n.b.	4,0	n.b.	3,3
	60-90	0,5	n.b.	0,7	n.b.	0,3

## Anhang 27: Verhältnis von heißwasserextrahierbarem Stickstoff zu Gesamt-Stickstoff zur Aussaat, Winteranbau 2013/14



**Anhang 28: Vergleich der Gehalte an heißwasserextrahierbaren und Gesamtstickstoff der Versuchsstandorte zur Aussaat, Winteranbau 2013/14**

<i>Standort</i>	<i>Bodentiefe</i>	$N_{HWE}$	$N_t$	<i>Anteil <math>N_{HWE}</math> an <math>N_t</math></i>
	<i>[cm]</i>	<i>[mg N/100 g Boden]</i>		<i>[%]</i>
Lärz	0-30	8,2	99,0	8,3
	30-60	0,8	20,0	4,2
	60-90	0,4	8,0	4,8
Versmold 1	0-30	7,1	136,0	5,2
	30-60	3,1	75,0	4,1
	60-90	0,8	31,0	2,6
Versmold 2	0-30	9,4	128,0	7,3
	30-60	3,8	59,0	6,4
	60-90	0,5	13,0	3,7

**Anhang 29: Tageslänge der Standorte Lärz und Versmold**

**Anhang 30: Pflanzenhöhen der verschiedenen Beprobungen, Winteranbau 2013/14**

	<i>Blühende</i>			<i>Wachstumsende</i>			<i>Nach Frost</i>			<i>Ernte</i>		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>
	<i>[cm]</i>			<i>[cm]</i>			<i>[cm]</i>			<i>[cm]</i>		
L, 25	131,9	17,2	20	116,9	27,4	15	156,2	16,9	17	138,4	18,4	16
L, 50	122,7	21,9	21	122,4	19,8	18	143,9	15,4	17	146,1	15,9	20
V1, 25	128,2	18,5	17	128,8	13,1	15	110,3	12,6	16	124,3	15,9	16
V1, 50	106,8	18,3	20	112,8	16,3	17	n.b.	n.b.	n.b.	121,9	15,8	19
V2,25	102,6	8,8	16	138,1	11,8	16	118,9	8,3	16	106,2	15,9	13
V2, 50	111,5	12,2	19	106,6	16,8	16	112,2	11,2	17	145,1	14,7	17



**Anhang 31: Signifikanzniveaus der statistischen Auswertung der Pflanzenbonituren, Winteranbau 2013/14**

	<i>L, 25-L, 50</i>	<i>V1, 25-V1, 50</i>	<i>V2, 25 - V2, 50</i>	<i>L, 25-V1, 25</i>	<i>L, 25 - V2, 25</i>	<i>V1, 25-V2 25</i>	<i>L50- V1, 50</i>	<i>L50 -V2 50</i>	<i>V1, 50- V2, 50</i>	<i>n</i>
Wachstumsverlauf <sup>(x)</sup>	0,214	0,678	0,698	≤0,001	0,008	0,183	0,003	0,106	0,231	20
Pflanzenhöhen	0,142	≤0,001	0,020	0,527	≤0,001	≤0,001	0,016	0,057	0,347	20
Stängeldurchmesser <sup>(x)</sup>	0,527	0,175	0,193	0,270	0,089	0,533	0,555	0,161	0,385	20
Wurzellänge <sup>(x)</sup>	0,118	0,305	0,502	≤0,001	≤0,001	0,086	≤0,001	≤0,001	≤0,001	20

**Anhang 32: Stängeldurchmesser der verschiedenen Beprobungen, Winteranbau 2013/14**

	<i>Blühende</i>			<i>Wachstumsende</i>			<i>Nach Frost</i>			<i>Ernte</i>		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>
	<i>[cm]</i>			<i>[cm]</i>			<i>[cm]</i>			<i>[cm]</i>		
L, 25	5,4	1,4	20	5,1	1,9	15	7,1	1,2	17	4,9	1,2	16
L, 50	5,2	1,7	21	4,9	1,3	18	6,1	1,4	17	6,5	1,4	20
V1, 25	6,1	1,4	17	5,4	0,8	15	4,5	1,0	16	6,7	1,4	16
V1, 50	5,4	1,1	20	5,1	1,4	17	n.b.	n.b.	n.b.	5,0	1,0	19
V2,25	6,2	0,9	16	6,5	1,2	16	5,5	0,9	16	4,2	1,1	13
V2, 50	2,8	1,1	19	5,8	1,5	16	4,5	0,9	17	7,0	1,2	18

**Anhang 33: Wurzellängen der verschiedenen Beprobungen, Winteranbau 2013/14**

	<i>Blühende</i>			<i>Wachstumsende</i>			<i>Nach Frost</i>			<i>Ernte</i>		
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>
	<i>[cm]</i>			<i>[cm]</i>			<i>[cm]</i>			<i>[cm]</i>		
L, 25	7,6	1,3	20	7,8	1,3	15	6,2	1,6	17	10,0	1,9	16
L, 50	8,3	1,9	21	8,5	1,7	18	6,1	1,1	17	9,5	1,7	20
V1, 25	12,4	3,3	17	9,4	2,6	15	5,7	2,0	16	7,1	1,6	16
V1, 50	11,4	2,7	20	11,8	3,6	17	n.b.	n.b.	n.b.	7,9	2,1	19
V2,25	14,8	3,1	16	15,1	3,4	16	9,8	2,1	16	6,5	1,5	13
V2, 50	15,4	5,7	19	14,7	5,9	16	8,4	1,8	17	8,9	2,6	18

**Anhang 34: Ausdünnungsrate zur Beprobung zur Blüte, Winteranbau 2013/14**

<i>Standort</i>	<i>Aussaatstärke</i>	<i>Pflanzenauf-</i>	<i>Pflanzenzah-</i>	<i>Ausdünnung</i>
	<i>[kg/ha]</i>	<i>lauf</i>	<i>len zur Blüte</i>	
		<i>[Pfl./m<sup>2</sup>]</i>	<i>[Pfl./m<sup>2</sup>]</i>	<i>[%]</i>
Lärz	25	94	93	1,1
Lärz	50	186	120	35,5
Versmold 1	25	80	76	5,0
Versmold 1	50	190	188	1,1
Versmold 2	25	140	138	1,4
Versmold 2	50	304	298	2,0

**Anhang 35: Pflanzenzahl pro Quadratmeter zur Ernte, Winteranbau 2013/14**

<i>Standort</i>	<i>Aussaat- stärke</i>	<i>M</i>	<i>Mdn.</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>
	<i>[kg/ha]</i>						
				<i>[Pfl./m<sup>2</sup>]</i>			
Lärz	25	54,0	55,0	44,0	63,0	9,5	3
Lärz	50	88,7	102,0	62,0	102,0	23,1	3
Versmold 1	25	57,0	56,0	55,0	60,0	2,6	3
Versmold 1	50	69,7	72,0	52,0	85,0	16,6	3
Versmold 2	25	89,3	87,0	60,0	121,0	30,6	3
Versmold 2	50	65,0	69,0	41,0	85,0	22,3	3

**Anhang 36: Errechnete Hektarerträge aus den Quadratmeterernten, Winteranbau 2013/14**

<i>Standort</i>	<i>Aussaat- stärke</i>	<i>M</i>	<i>Mdn.</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>
	<i>[kg/ha]</i>						
				<i>[Pfl./m<sup>2</sup>]</i>			
Lärz	25	28,4	26,9	25,4	32,8	3,9	3
Lärz	50	30,7	28,3	28,2	35,8	4,3	3
Versmold 1	25	24,4	25,0	22,2	25,9	1,9	3
Versmold 1	50	22,4	22,1	21,3	23,8	1,3	3
Versmold 2	25	35,0	29,3	26,9	48,9	12,1	3
Versmold 2	50	33,7	34,9	25,8	40,3	7,3	3

**Anhang 37 Gewichtsanteile der einzelnen Pflanzenteile am Gesamtpflanzengewicht, Probenahme zur Blüte, Winteranbau 2013/14**

<i>Standort</i>	<i>Aussaatstärke</i>	<i>Blüte</i>	<i>Blatt</i>	<i>Stängel</i>	<i>Wurzel</i>
	<i>[kg/ha]</i>	<i>Gewichtsanteil am Gesamtpflanzengewicht[%]</i>			
PN zum Blühende					
Lärz	25	4,7	24,8	64,7	5,8
Lärz	50	5,9	23,9	65,2	5,0
Versmold 1	25	2,9	27,4	61,7	8,1
Versmold 1	50	4,6	33,3	54,0	8,1
Versmold 2	25	5,7	32,0	53,0	9,3
Versmold 2	50	3,5	27,9	60,5	8,1
PN zum Wachstumsende					
Lärz	25	8,0	15,5	70,8	5,7
Lärz	50	7,8	16,2	70,4	5,5
Versmold 1	25	13,5	10,2	69,5	6,8
Versmold 1	50	15,1	13,6	64,7	6,6
Versmold 2	25	16,9	4,1	73,2	5,8
Versmold 2	50	9,9	1,5	81,4	7,2
PN nach Frost					
Lärz	25	0,4	n.b.	92,5	7,1
Lärz	50	0,0	n.b.	91,8	8,2
Versmold 1	25	4,8	n.b.	86,0	9,2
Versmold 1	50	2,7	n.b.	90,2	7,2
Versmold 2	25	3,0	n.b.	87,6	9,4
Versmold 2	50	1,1	n.b.	92,2	6,8
PN zur der Ernte					
Lärz	25	0,7	n.b.	90,9	8,4
Lärz	50	0,8	n.b.	91,9	7,3
Versmold 1	25	2,7	n.b.	88,8	8,5
Versmold 1	50	5,0	n.b.	87,7	7,3
Versmold 2	25	0,6	n.b.	93,1	6,3
Versmold 2	50	n.b.	n.b.	92,5	7,5

**Anhang 38: Stickstoffgehalte der Pflanzenteile zu den verschiedenen Beprobungen,  
Winteranbau 2013/14**

<i>Standort</i>	<i>Aussaat- stärke</i>	<i>Pflanzenteil</i>	<i>Blühende</i>	<i>Wachstums- ende</i>	<i>nach Frost</i>	<i>Ernte</i>
	<i>[kg/ha]</i>					
				<i>Stickstoffgehalt [%]</i>		
Lärz	25	Blüte	4,09	3,90	4,12	3,73
Lärz	25	Blatt	2,62	3,31	n.b.	n.b.
Lärz	25	Stängel	0,77	0,84	1,06	0,83
Lärz	25	Wurzel	0,76	0,84	0,72	0,74
Lärz	50	Blüte	4,18	4,08	n.b.	3,82
Lärz	50	Blatt	3,11	3,13	n.b.	n.b.
Lärz	50	Stängel	0,77	1,16	0,91	0,65
Lärz	50	Wurzel	0,85	0,96	0,75	0,62
Versmold 1	25	Blüte	5,06	4,35	3,77	3,78
Versmold 1	25	Blatt	3,84	4,00	n.b.	n.b.
Versmold 1	25	Stängel	1,14	1,16	0,91	1,00
Versmold 1	25	Wurzel	1,11	0,87	0,48	0,48
Versmold 1	50	Blüte	5,21	4,24	3,88	3,10
Versmold 1	50	Blatt	4,11	3,61	n.b.	n.b.
Versmold 1	50	Stängel	0,99	1,41	0,95	0,82
Versmold 1	50	Wurzel	0,95	0,69	0,56	0,53
Versmold 2	25	Blüte	4,70	3,74	3,51	n.b.
Versmold 2	25	Blatt	3,06	3,39	n.b.	n.b.
Versmold 2	25	Stängel	0,92	0,96	0,64	0,91
Versmold 2	25	Wurzel	0,78	0,64	0,58	0,52
Versmold 2	50	Blüte	4,57	3,92	3,61	1,23
Versmold 2	50	Blatt	3,15	3,14	n.b.	n.b.
Versmold 2	50	Stängel	1,14	0,68	0,70	n.b.
Versmold 2	50	Wurzel	0,83	0,63	0,58	0,73

**Anhang 39: Phosphorgehalte der Pflanzenteile zu den verschiedenen Beprobungen,  
Winteranbau 2013/14**

<i>Standort</i>	<i>Aussaat- stärke</i>	<i>Pflanzenteil</i>	<i>Blühende</i>	<i>Wachstums- ende</i>	<i>nach Frost</i>	<i>Ernte</i>
	<i>[kg/ha]</i>			<i>Phosphorgehalt [%]</i>		
Lärz	25	Blüte	1,11	1,15	0,74	0,78
Lärz	25	Blatt	0,50	0,93	n.b.	n.b.
Lärz	25	Stängel	0,22	0,23	0,21	0,14
Lärz	25	Wurzel	0,18	0,17	0,10	0,10
Lärz	50	Blüte	1,24	1,05	n.b.	0,77
Lärz	50	Blatt	0,57	0,94	n.b.	n.b.
Lärz	50	Stängel	0,25	0,29	0,20	0,12
Lärz	50	Wurzel	0,20	0,17	0,14	0,09
Versmold 1	25	Blüte	0,88	1,02	1,05	0,86
Versmold 1	25	Blatt	0,49	1,01	n.b.	n.b.
Versmold 1	25	Stängel	0,21	0,21	0,21	0,17
Versmold 1	25	Wurzel	0,25	0,13	0,09	0,08
Versmold 1	50	Blüte	0,92	1,09	1,08	0,91
Versmold 1	50	Blatt	0,68	1,10	n.b.	n.b.
Versmold 1	50	Stängel	0,25	0,33	0,27	0,18
Versmold 1	50	Wurzel	0,17	0,18	0,11	0,10
Versmold 2	25	Blüte	0,97	0,99	1,12	0,70
Versmold 2	25	Blatt	0,66	1,00	n.b.	n.b.
Versmold 2	25	Stängel	0,28	0,24	0,14	0,17
Versmold 2	25	Wurzel	0,21	0,20	0,12	0,07
Versmold 2	50	Blüte	1,03	1,23	1,12	n.b.
Versmold 2	50	Blatt	0,60	1,24	n.b.	n.b.
Versmold 2	50	Stängel	0,40	0,20	0,15	0,23
Versmold 2	50	Wurzel	0,31	0,20	0,16	0,13

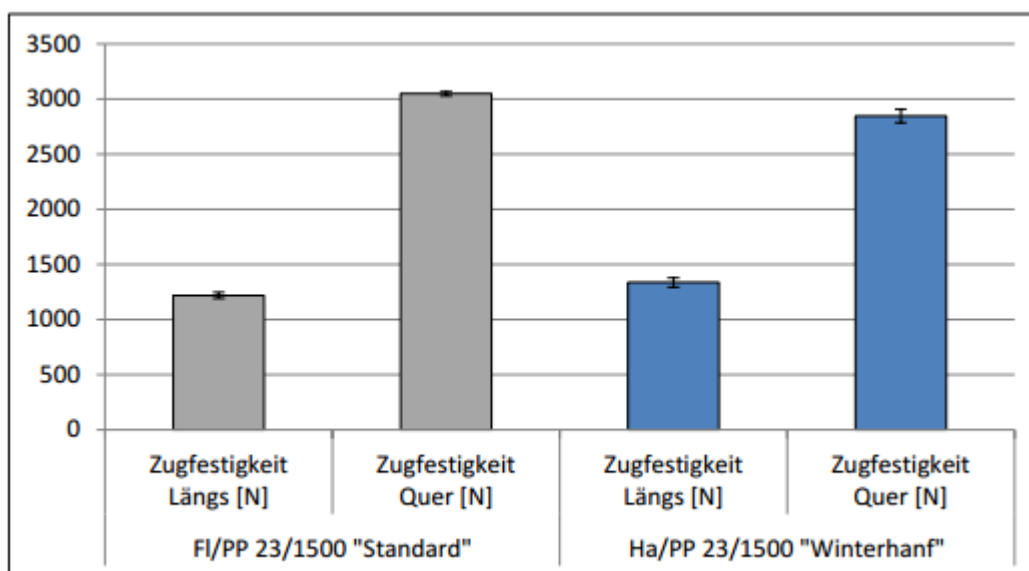
**Anhang 40: Kaliumgehalte der Pflanzenteile zu den verschiedenen Beprobungen, Winteranbau 2013/14**

<i>Standort</i>	<i>Aussaat- stärke</i>	<i>Pflanzenteil</i>	<i>Blühende</i>	<i>Wachstums- ende</i>	<i>nach Frost</i>	<i>Ernte</i>
	<i>[kg/ha]</i>			<i>Kaliumgehalt [%]</i>		
Lärz	25	Blüte	2,63	1,54	0,79	0,49
Lärz	25	Blatt	2,71	2,34	n.b.	n.b.
Lärz	25	Stängel	1,89	1,55	0,33	0,16
Lärz	25	Wurzel	2,65	2,29	0,22	0,22
Lärz	50	Blüte	2,58	1,45	n.b.	0,64
Lärz	50	Blatt	3,87	2,98	n.b.	n.b.
Lärz	50	Stängel	1,76	1,19	0,21	0,22
Lärz	50	Wurzel	1,85	1,77	0,18	0,24
Versmold 1	25	Blüte	2,57	1,63	0,65	0,42
Versmold 1	25	Blatt	3,97	2,08	n.b.	n.b.
Versmold 1	25	Stängel	2,74	1,45	0,28	0,01
Versmold 1	25	Wurzel	2,30	2,15	0,20	0,17
Versmold 1	50	Blüte	2,60	1,49	0,57	0,43
Versmold 1	50	Blatt	2,94	1,90	n.b.	n.b.
Versmold 1	50	Stängel	2,54	1,35	0,30	0,18
Versmold 1	50	Wurzel	2,47	1,70	0,18	0,18
Versmold 2	25	Blüte	2,58	1,82	0,66	0,30
Versmold 2	25	Blatt	3,52	2,12	n.b.	n.b.
Versmold 2	25	Stängel	2,15	1,61	0,15	0,10
Versmold 2	25	Wurzel	2,00	2,11	0,18	0,15
Versmold 2	50	Blüte	2,71	1,56	0,48	n.b.
Versmold 2	50	Blatt	3,92	2,17	n.b.	n.b.
Versmold 2	50	Stängel	2,22	1,66	0,10	0,13
Versmold 2	50	Wurzel	2,44	1,99	0,14	0,20

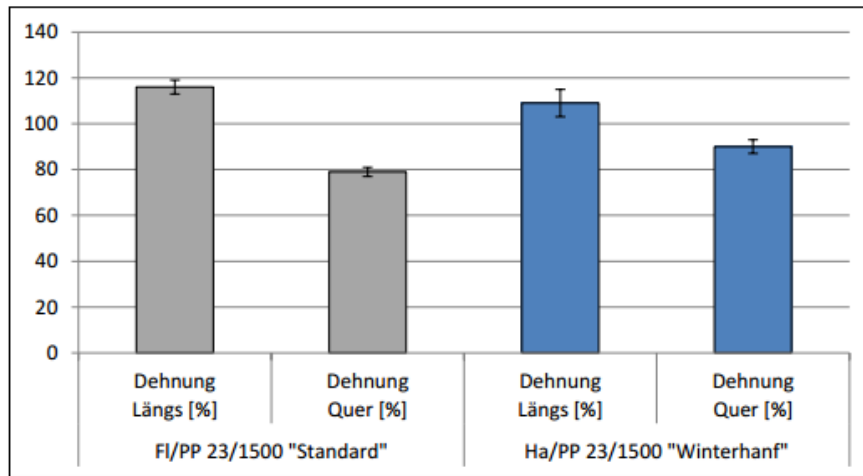
## Anhang 42: Statistische Auswertung der Faserqualität, Winteranbau 2013/14

Testvariable	Lärz, 25 - Lärz, 50	Versmold 1, 25 - Versmold 2, 50	Versmold 2, 25 - Versmold 2, 50	Lärz, 25 - Versmold 1, 25	Lärz, 25 - Versmold 2, 25	Versmold 1, 25 - Versmold 2, 25	Lärz, 50 - Versmold 1, 50	Lärz, 50 - Versmold 2, 50	Versmold 1, 50 - Versmold 2, 50	n
Faserbreite <sup>(x)</sup>	0,027	0,008	0,077	≤ 0,001	≤ 0,001	0,362	≤ 0,001	0,060	0,002	34132
Zugfestigkeit <sup>(x)</sup>	0,259	≤ 0,001	0,298	≤ 0,001	≤ 0,001	0,018	0,190	≤ 0,001	0,035	78
Zugmodul <sup>(x)</sup>	0,532	≤ 0,001	≤ 0,001	≤ 0,001	0,034	0,014	0,194	≤ 0,001	≤ 0,001	78
Bruchdehnung <sup>(x)</sup>	≤ 0,001	0,293	0,038	≤ 0,001	≤ 0,001	0,454	≤ 0,001	0,030	0,079	78

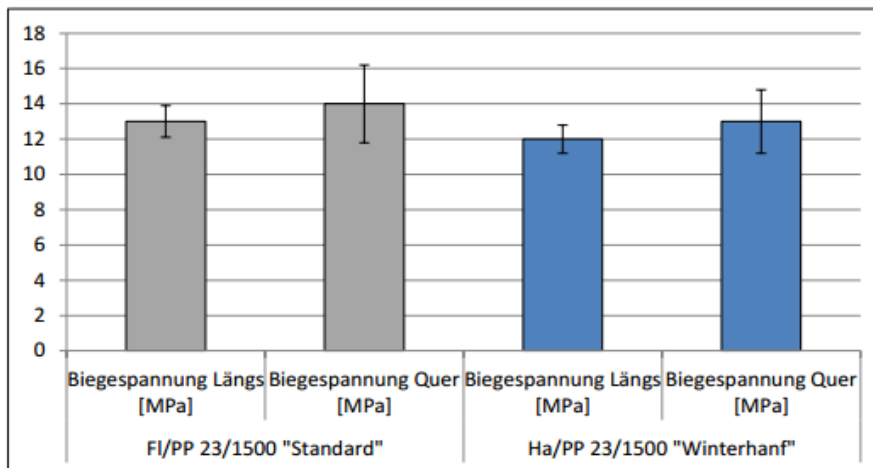
## Anhang 41: Vergleich der Zugfestigkeiten der Halbzeuge aus Flachs (Fl) und Hanf des Winteranbaus 2013/14 (Ha), Polyvlies GmbH



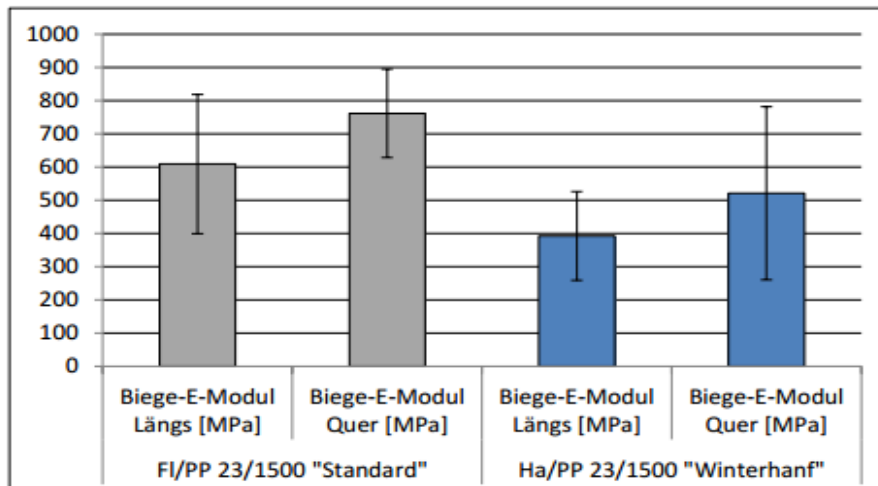
**Anhang 43: Vergleich der Dehnung der Halbzeuge aus Flachs (Fl) und Hanf des Winteranbaus 2013/14 (Ha), Polyvlies GmbH**



**Anhang 44: Vergleich der Biegespannung der Formpressteile mit Flachs (Fl) und Hanf des Winteranbaus 2013/14 (Ha), Polyvlies GmbH**

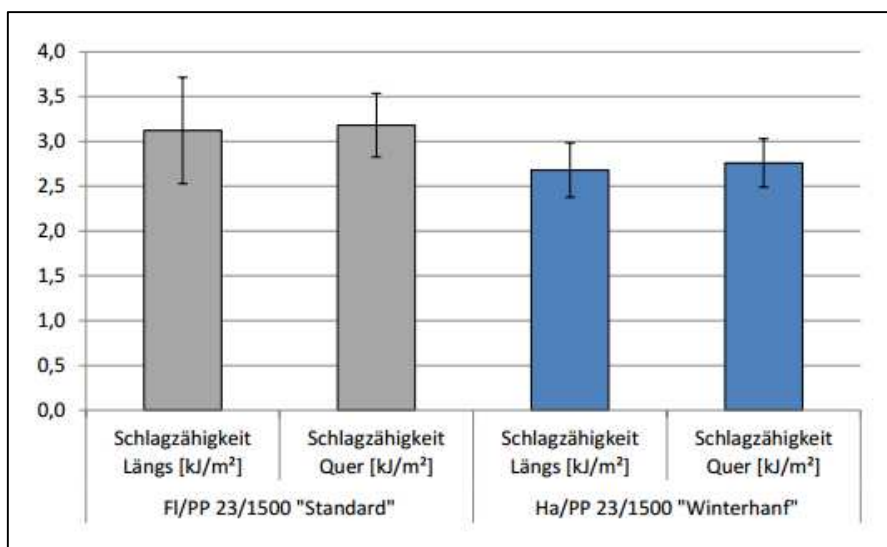


**Anhang 45: Vergleich des Biege-E-Moduls der Formpressteile mit Flachs (Fl) und Hanf des Winteranbaus 2013/14 (Ha), Polyvlies GmbH**





**Anhang 46: Vergleich der Schlagzähigkeit der Formpressteile mit Flachs (Fl) und Hanf aus dem Winteranbau 2013/14 (Ha), Polyvlies GmbH**



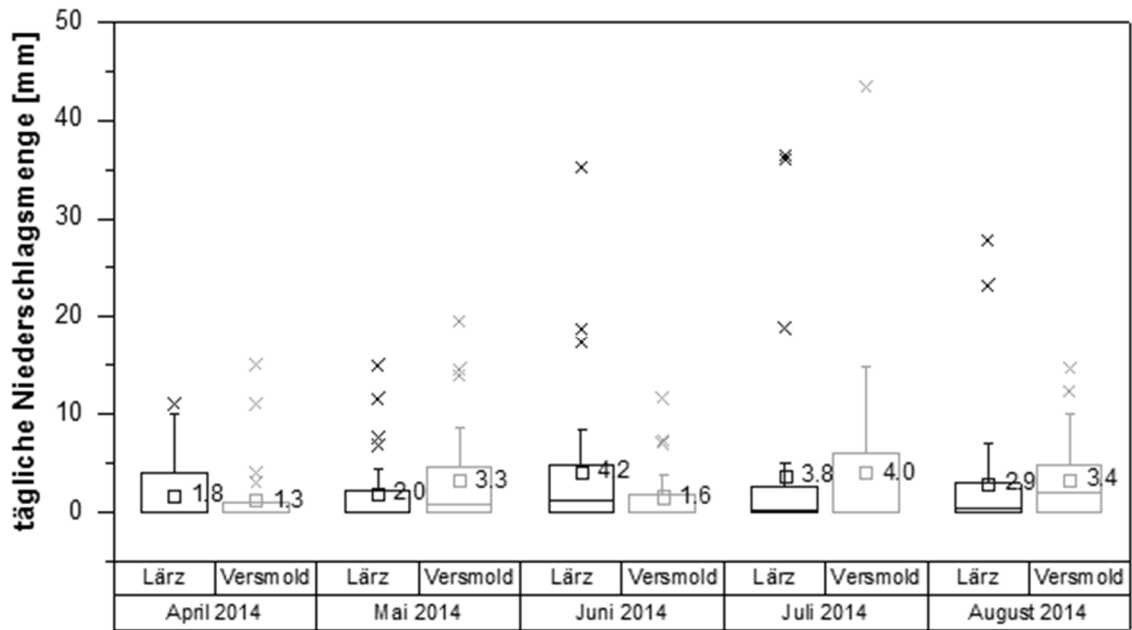
**Anhang 47: Signifikanzniveaus der Temperaturen und Niederschläge zwischen den Standorten, Sommeranbau 2014**

	<i>Tagesmitteltemperatur<sup>(x)</sup></i>	<i>Tagesniederschlagssumme<sup>(x)</sup></i>	<i>n</i>
gesamter Zeitraum (April - August)	0,932	0,763	153
April	0,258	0,927	30
Mai	0,978	0,320	31
Juni	0,877	0,203	30
Juli	0,104	0,817	31
August	0,699	0,099	31
	<i>Monatsmitteltemperatur</i>	<i>Monatsniederschlagssumme<sup>(x)</sup></i>	
Lärz langjähriges Mittel - Wetter Sommeranbau (April-August)	0,951	0,032	5
Versmold langjähriges Mittel - Wetter Winteranbau (April-August)	0,986	0,548	5
	<i>Temperatursumme<sup>(x)</sup></i>	<i>Niederschlagssumme<sup>(x)</sup></i>	
	0,780	0,533	137
		<i>Anzahl Regentage</i>	
April - August		0,482	5

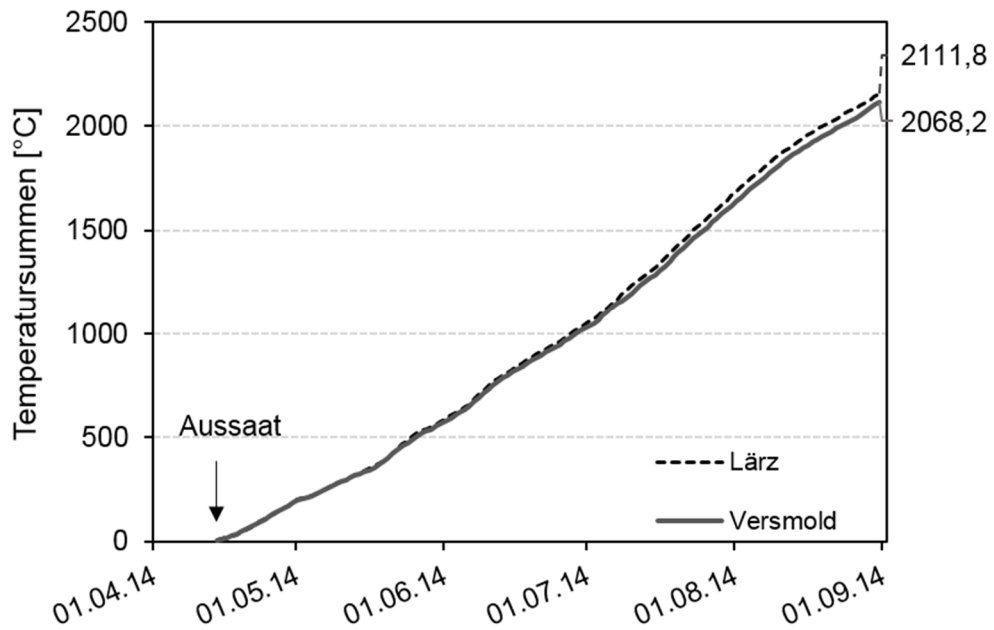
**Anhang 48: Niederschlagsmengen zur Aussaat, Sommeranbau 2014**

	Lärz	Versmold
<i>Zeitraum/-punkt</i>	<i>[mm]</i>	
7 d vor Aussaat	19,6	4,8
Tag der Aussaat	0,2	4,0
7 d nach Aussaat	24,0	5,5

Anhang 49: Box-Whisker-Plot der täglichen Niederschlagsmengen, Sommeranbau 2014



Anhang 50: Temperatursummen, Sommeranbau 2014



**Anhang 51: Nitratstickstoffgehalte im Boden, Sommeranbau 2014**

<i>Standort</i>		<i>Aussaat</i>	<i>Ernte</i>
		<i>[kg NO<sub>3</sub>-N/ha]</i>	
Lärz	0-30	90,5	15,5
	30-60	55,1	9,5
	60-90	21,8	19,7
Versmold	0-30	188,9	22,5
	30-60	48,1	7,1
	60-90	10,3	21,3

**Anhang 52: Phosphorgehalte im Boden, Sommeranbau 2014**

<i>Standort</i>		<i>Aussaat</i>	<i>Ernte</i>
		<i>[mg P/100 g Boden]</i>	
Lärz	0-30	4,8	7,3
	30-60	0,8	2,0
	60-90	0,7	0,8
Versmold	0-30	15,3	17,9
	30-60	3,6	4,3
	60-90	2,9	2,1

**Anhang 53: Kaliumgehalte im Boden, Sommeranbau 2014**

<i>Standort</i>		<i>Aussaat</i>	<i>Ernte</i>
		<i>[mg K/100 g Boden]</i>	
Lärz	0-30	5,2	5,4
	30-60	1,4	2,4
	60-90	3,6	2,6
Versmold	0-30	8,2	4,2
	30-60	1,7	2,2
	60-90	2,4	1,7

**Anhang 54: Gehalte an heißwasserextrahierbarem Kohlenstoff und Stickstoff, Sommeranbau 2014**

	<i>Boden- tiefe</i>	<i>Aussaat</i>	<i>Ernte</i>	<i>Aussaat</i>	<i>Ernte</i>
	<i>[cm]</i>	<i>[mg C<sub>HWE</sub>/100 g Boden]</i>		<i>[mg N<sub>HWE</sub>/100 g Boden]</i>	
Lärz	0-30	76,69	87,63	8,18	9,27
	30-60	21,24	36,55	0,72	3,98
	60-90	12,10	10,57	0,21	0,22
Versmold	0-30	77,18	75,04	7,75	7,60
	30-60	33,06	28,64	1,40	0,93
	60-90	16,14	17,74	0,38	0,33

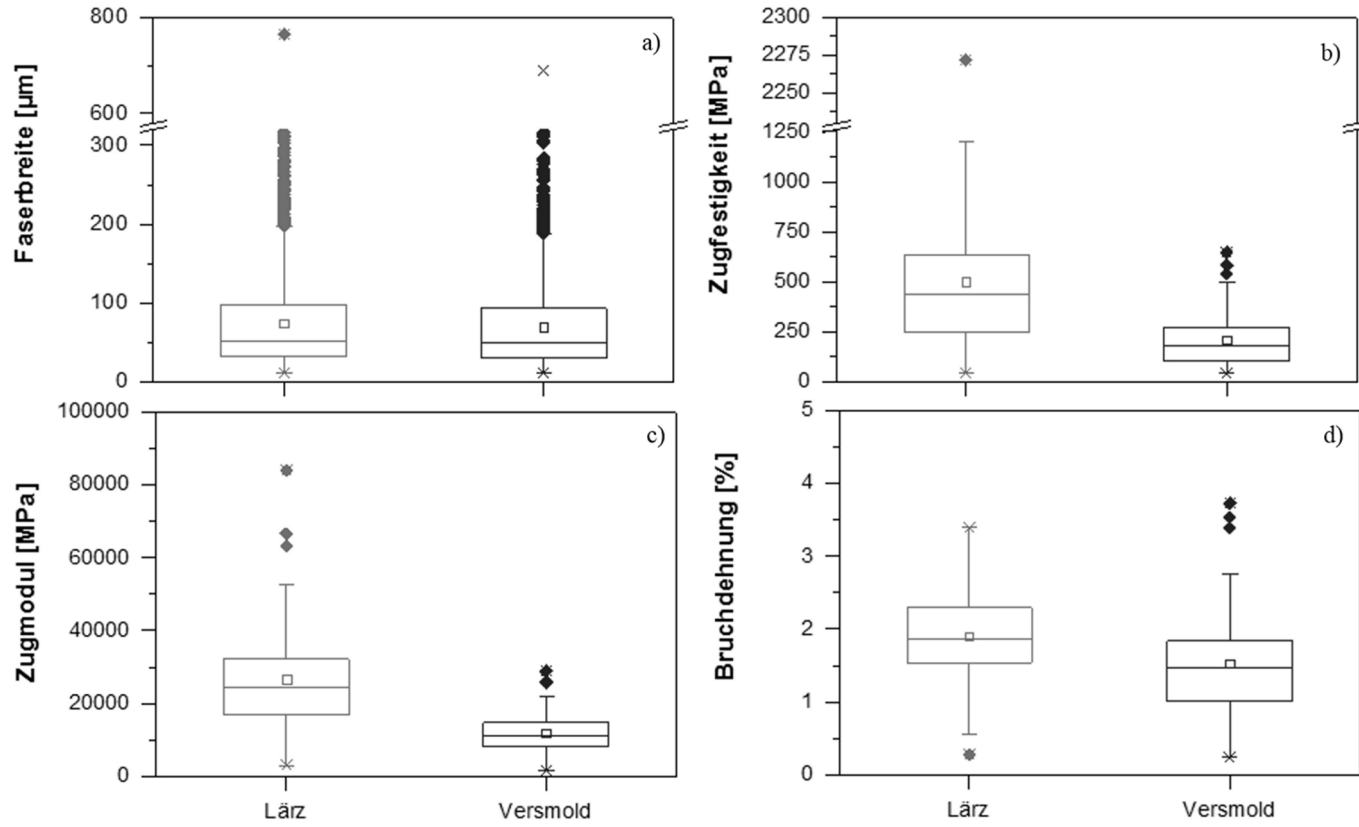
**Anhang 55: Ergebnisse der statistischen Auswertung der Bodennährstoffe, Sommeranbau 2014**

<i>Testvariable</i>	<i>Bodentiefe [cm]</i>	<i>Lärz - Versmold</i>	<i>n</i>
C <sub>HWE</sub>	0-30 <sup>(x)</sup>	0,009	6
C <sub>HWE</sub>	30-60	0,593	6
C <sub>HWE</sub>	60-90	≤ 0,001	6
N <sub>HWE</sub>	0-30 <sup>(x)</sup>	0,004	6
N <sub>HWE</sub>	30-60	0,163	6
N <sub>HWE</sub>	60-90	≤ 0,001	6

**Anhang 56: Statistische Auswertung der Faserqualität, Sommeranbau 2014**

<i>Testvariable</i>	<i>Lärz - Versmold</i>	<i>n</i>
Faserbreite <sup>(x)</sup>	≤ 0,001	24172
Zugfestigkeit <sup>(x)</sup>	≤ 0,001	78
Zugmodul <sup>(x)</sup>	≤ 0,001	78
Bruchdehnung	≤ 0,001	78

Anhang 57: Box-Whisker-Plot der Faserbreite (a), der Zugfestigkeit (b), des Zugmoduls (c) und der Bruchdehnung (d), Sommeranbau 2014 (Whisker = 1,5-facher IQR, Rauten = Ausreißer, Kreuze = Min- und Max-Werte)



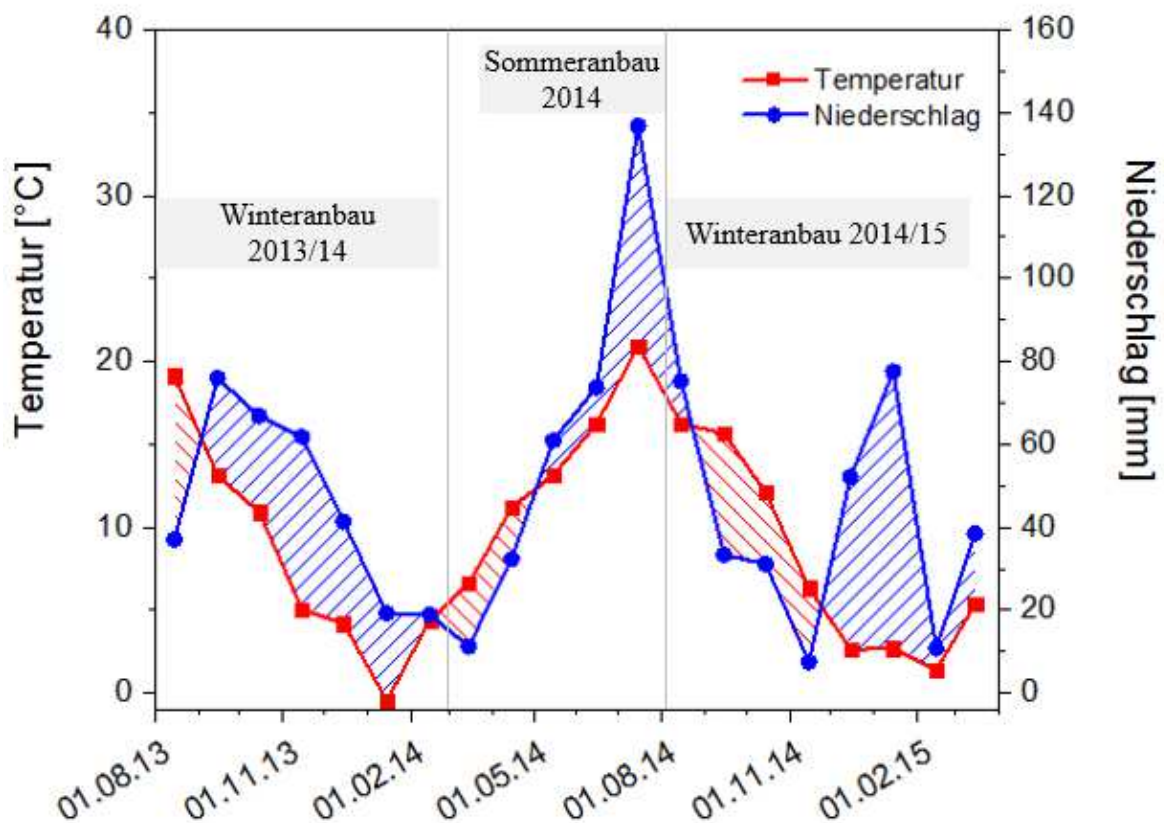
## Anhang 58: Statistische Auswertung Vergleich Winteranbau 2013/14 und Sommeranbau 2014

		Sommeranbau 2014	
		Lärz, 25	Versmold 25
		Pflanzenhöhe <sup>(x)</sup>	
Winteranbau 13/14	Lärz, 25	≤ 0,001	≤ 0,001
	Lärz, 50	≤ 0,001	≤ 0,001
	Versmold 1, 25	≤ 0,001	≤ 0,001
	Versmold 1, 50	≤ 0,001	≤ 0,001
	Versmold 2, 25	≤ 0,001	≤ 0,001
	Versmold 2, 50	≤ 0,001	≤ 0,001
		Stängeldurchmesser <sup>(x)</sup>	
Winteranbau 13/14	Lärz, 25	≤ 0,001	≤ 0,001
	Lärz, 50	≤ 0,001	≤ 0,001
	Versmold 1, 25	≤ 0,001	≤ 0,001
	Versmold 1, 50	≤ 0,001	≤ 0,001
	Versmold 2, 25	≤ 0,001	≤ 0,001
	Versmold 2, 50	≤ 0,001	≤ 0,001
		Faserbreite <sup>(x)</sup>	
Winteranbau 13/14	Lärz, 25	≤ 0,001	≤ 0,001
	Lärz, 50	≤ 0,001	≤ 0,001
	Versmold 1, 25	≤ 0,001	0,408
	Versmold 1, 50	≤ 0,001	0,005
	Versmold 2, 25	≤ 0,001	0,678
	Versmold 2, 50	≤ 0,001	0,196
		Zugfestigkeit <sup>(x)</sup>	
Winteranbau 13/14	Lärz, 25	0,217	≤ 0,001
	Lärz, 50	0,032	≤ 0,001
	Versmold 1, 25	≤ 0,001	≤ 0,001
	Versmold 1, 50	0,004	0,016
	Versmold 2, 25	≤ 0,001	0,154
	Versmold 2, 50	≤ 0,001	0,958
		Zugmodul <sup>(x)</sup>	
Winteranbau 13/14	Lärz, 25	≤ 0,001	0,710
	Lärz, 50	≤ 0,001	0,388
	Versmold 1, 25	≤ 0,001	≤ 0,001
	Versmold 1, 50	≤ 0,001	0,033
	Versmold 2, 25	≤ 0,001	0,043
	Versmold 2, 50	≤ 0,001	0,005
		Bruchdehnung <sup>(x)</sup>	
Winteranbau 13/14	Lärz, 25	≤ 0,001	≤ 0,001
	Lärz, 50	≤ 0,001	≤ 0,001
	Versmold 1, 25	0,531	0,005
	Versmold 1, 50	0,424	≤ 0,001
	Versmold 2, 25	0,736	≤ 0,001
	Versmold 2, 50	0,004	≤ 0,001

Anhang 59: Ergebnisse der statistischen Auswertung Wettervergleich, Lysimeter

	Falkenberg- Lärz	Falkenberg Vermold	n
<i>Winteranbau 2013/14</i>			
Temperatur August-September <sup>(x)</sup>	0,627	0,289	56
Niederschlag August-September <sup>(x)</sup>	0,775	0,226	56
<i>Sommeranbau 2014</i>			
Temperatur April-August <sup>(x)</sup>	0,214	0,208	149
Niederschlag April-August <sup>(x)</sup>	0,517	0,382	149
<i>Vergleich Winteranbau 2013/14 -2014/15</i>			
Temperatur August-September <sup>(x)</sup>		0,892	56
Niederschlag August-September <sup>(x)</sup>		0,477	56

Anhang 60: Wasserverfügbarkeit nach Heyland (1991) für die gesamte Anbauzeit auf den Lysimetern



**Anhang 61: Ergebnisse der statistischen Analyse Pflanzenbonituren Lysimeter**

	Lys 29 - Lys 30	Lys 116 - Lys 117		n
<i>Winteranbau 2013/14</i>				
			ungedüngt - gedüngt	
Wachstumsverlauf	0,652	0,13	≤ 0,001	30
Pflanzenhöhe	0,410	0,406	≤ 0,001	30
Stängeldurchmesser	0,675	0,966	≤ 0,001	28
<i>Sommeranbau 2014</i>				
			80 kg N/ha – 120 kg N/ha	
Wachstumsverlauf <sup>(x)</sup>	0,304	0,210	≤ 0,001	50
Pflanzenhöhe <sup>(x)</sup>	0,744	0,653	≤ 0,001	30
Stängeldurchmesser <sup>x)</sup>	0,775	0,713	0,002	30
Wurzellänge	0,834	0,868	≤ 0,001	30

**Anhang 62: Nährstoffgehalte der Pflanzenteile auf den Lysimetern, Sommeranbau 2014**

<i>Düngung</i>		<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>
<i>[kg N/ha]</i>			<i>[%]</i>	
80	Blüte	4,4	0,6	1,8
	Blatt	3,1	0,3	1,4
	Stängel	0,8	0,1	0,7
	Wurzel	0,8	0,1	0,7
120	Blüte	4,0	0,5	2,0
	Blatt	2,7	0,2	1,5
	Stängel	0,6	0,1	0,7
	Wurzel	0,7	0,1	0,8

**Anhang 63: Korrelation zwischen Niederschlags- und Sickerwassermenge**

<i>Korrelation Niederschlag und Sickerwassermenge</i>							
	Lys. 20	Lys. 107	Lys. 29	Lys. 30	Lys. 116	Lys. 117	n
Korrelations- koeffizient	0,007	0,035	0,017	0,064	0,285	0,252	20
Bestimmtheitsmaß [R <sup>2</sup> ]	0,403	0,471	0,117	0,125	0,011	0,010	



**Anhang 64: Anzahl der sickwasserführenden Monate über den Gesamtanbauzeitraum (20 Monate)**

<i>Lysimeter-Nr.</i>	<i>Nutzung</i>	<i>Anzahl der sickwasserführenden Monate</i>
		<i>[n]</i>
20	Schwarzbrache	20
107	Schwarzbrache	20
29	Hanf (niedrige Düngung)	7
30	Hanf (niedrige Düngung)	8
116	Hanf (hohe Düngung)	2
117	Hanf (hohe Düngung)	2
21	Integrierter Landbau	7
22	Integrierter Landbau	9
25	Integrierter Landbau	10
26	Integrierter Landbau	11

**Anhang 65: Korrelationskoeffizienten der Nährstoffkonzentrationen des Lysimeter-Experimentes**

		<i>Korrelationskoeffizienten</i>		<i>Regression</i>	
<i>Lys. 20</i>	<i>NO<sub>3</sub>-N</i>	<i>P<sup>(x)</sup></i>	<i>K<sup>(x)</sup></i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>n</i>
Sickerwasser <sup>(x)</sup>	0,576	0,761	0,420		20
NO <sub>3</sub> -N		0,678	0,001	0,334	20
P			0,366		20
<i>Lys. 107</i>					
	<i>NO<sub>3</sub>-N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>		
Sickerwasser <sup>(x)</sup>	0,327	0,134	0,766		20
NO <sub>3</sub> -N		0,219	0,012	0,182	20
P <sup>(x)</sup>			0,798		20
<i>Lys. 29</i>					
	<i>NO<sub>3</sub>-N</i>	<i>P<sup>(x)</sup></i>	<i>K<sup>(x)</sup></i>		
Sickerwasser <sup>(x)</sup>	0,702	0,968	0,879		7
NO <sub>3</sub> -N		0,655	0,036	0,150	7
P <sup>(x)</sup>			0,777		7
<i>Lys. 30</i>					
	<i>NO<sub>3</sub>-N</i>	<i>P<sup>(x)</sup></i>	<i>K<sup>(x)</sup></i>		
Sickerwasser <sup>(x)</sup>	1,000	0,037	0,823	0,247	8
NO <sub>3</sub> -N		0,750	0,531		8
P <sup>(x)</sup>			0,319		8

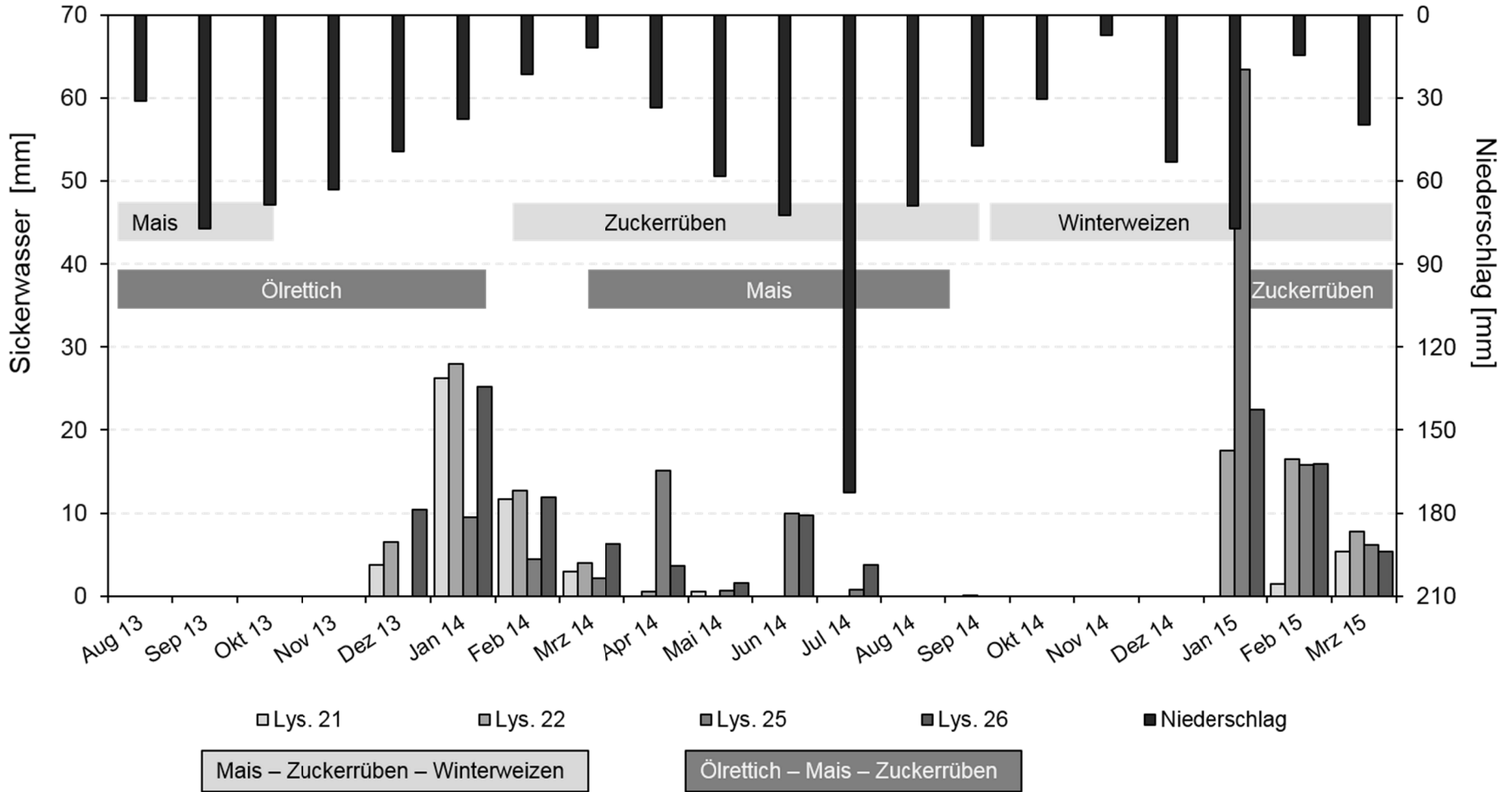
**Anhang 66: Korrelationskoeffizienten der Nährstoffgehalte des Lysimeter-Experimentes**

<i>Korrelationskoeffizienten/R<sup>2</sup></i>				
Lys. 20	NO <sub>3</sub> -N	P	K <sup>(x)</sup>	n
Sickerwasser <sup>(x)</sup>	≤ 0,001/0,649	0,002/0,400	0,001/0,933	19
NO <sub>3</sub> -N <sup>(x)</sup>		≤ 0,001/0,580	≤ 0,001/0,447	19
P <sup>(x)</sup>			0,006/0,324	19
Lys. 107				
	NO <sub>3</sub> -N	P	K <sup>(x)</sup>	
Sickerwasser <sup>(x)</sup>	≤ 0,001/0,888	0,678	≤ 0,001/0,914	20
NO <sub>3</sub> -N <sup>(x)</sup>		0,764	≤ 0,001/0,731	20
P <sup>(x)</sup>			0,736	20
Lys. 29				
	NO <sub>3</sub> -N	P	K	
Sickerwasser	0,011/0,702	0,087	0,065	7
NO <sub>3</sub> -N		0,513	0,387	7
P			0,116	7
Lys. 30				
	NO <sub>3</sub> -N	P	K	
Sickerwasser	0,004/0,744	0,651	0,027/0,523	8
NO <sub>3</sub> -N		0,493	0,078	8
P <sup>(x)</sup>			0,120	8

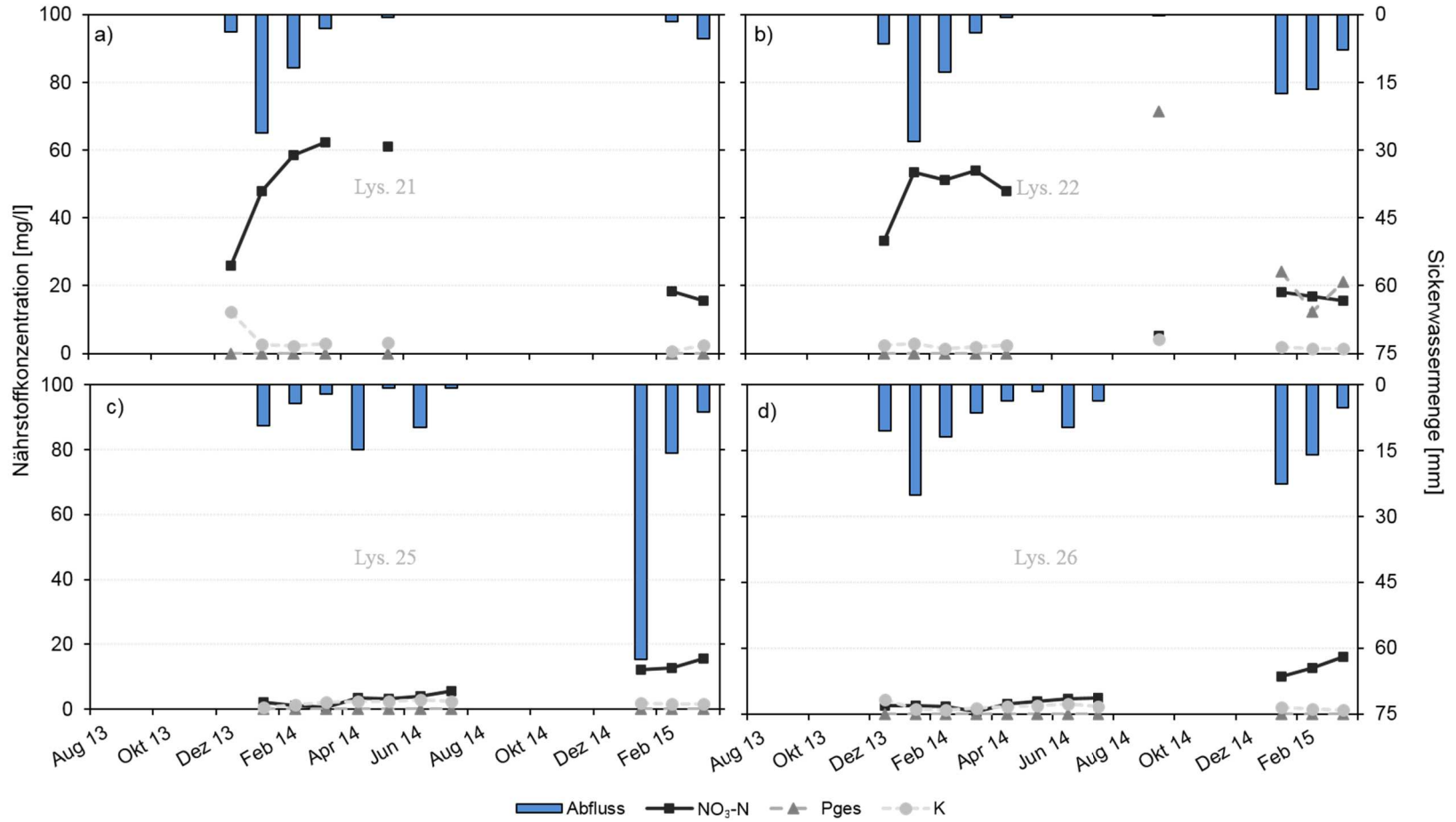
**Anhang 67: Signifikanzniveaus der Nährstoffkonzentrationen und -gehalte des Lysimeterversuches**

	20 - 107	29 - 30	20 - 29	20 - 30	107 - 29	107 - 30	21 - 22	25 - 26	20 - 21	20 - 22	20 - 25	20 - 26	107 - 21	107 - 22	107 - 25	107 - 26	21 - 29	22 - 29	21 - 30	22 - 30	25 - 29	25 - 30	26 - 29	26 - 30
Sickerwasser- menge <sup>(x)</sup>	0,627	0,613	0,015	0,019	0,041	0,07	0,408	0,557	0,022	0,172	0,056	0,112	0,031	0,234	0,198	0,244	0,902	0,351	0,779	0,606	0,417	0,762	0,179	0,272
Nährstoffkonzentration																								
NO <sub>3</sub> -N	0,061	0,021	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,252	0,973	0,977	0,223	<0,001	<0,001	0,179	0,030	<0,001	<0,001	0,053	0,299	<0,001	0,004	0,001	0,122	0,001	0,062
P <sup>(x)</sup>	0,667	0,779	0,692	0,979	0,709	0,498	0,210	0,314	0,976	0,095	0,769	0,372	0,725	0,127	0,530	0,197	0,710	0,142	0,955	0,167	0,962	0,897	0,479	0,351
K <sup>(x)</sup>	0,120	0,336	0,254	0,034	0,850	0,123	0,252	0,973	0,173	0,923	0,604	0,641	0,022	0,153	0,373	0,427	0,073	0,351	0,094	0,059	0,536	0,146	0,425	0,075
Nährstoffgehalte																								
NO <sub>3</sub> -N	0,687	0,613	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,681	0,468	0,015	0,085	<0,001	<0,001	0,110	0,030	<0,001	<0,001	0,383	0,114	0,189	0,093	0,230	0,740	0,246	0,545
P <sup>(x)</sup>	0,792	0,955	0,364	0,26	0,685	0,636	0,918	0,809	0,254	0,308	0,429	0,307	0,607	0,444	0,779	0,555	0,902	0,837	0,955	0,888	0,813	0,762	0,930	0,840
K <sup>(x)</sup>	0,396	0,955	0,013	0,008	0,048	0,013	0,918	0,426	0,231	0,142	0,094	0,158	0,341	0,365	0,469	0,359	0,456	0,351	0,397	0,277	0,475	0,515	0,126	0,091

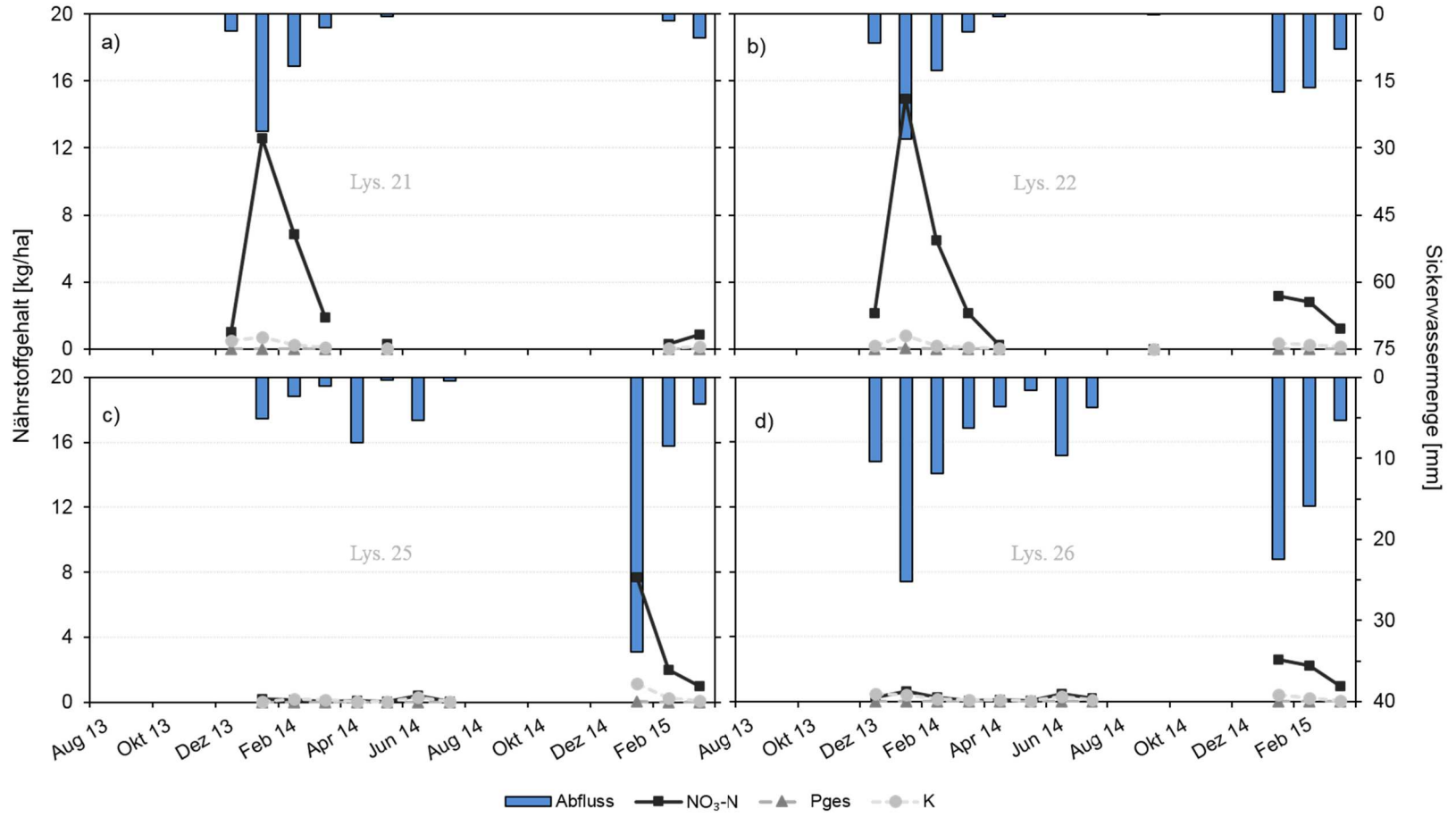
Anhang 68: Niederschläge und Sickerwassermengen, Lysimeter Integrierter Landbau



Anhang 69: Nährstoffkonzentrationen des Sickerwassers Integrierter Landbau



Anhang 70: Nährstoffausträge des Sickerwassers Integrierter Landbau



**Anhang 71: Nährstoffausträge nach Anbauzeit (WH 2013/14: Aug 13-Mrz 14, SH 2014: Apr 14-Aug 14, WH 2014/15: Aug 14-Mrz 15)**

Lys.-Nr.	Belegung	Anbauzeit	Sickerwasser	$NO_3-N$	$P_t$	$K$
			[mm]		[kg/ha]	
Lys. 29	Hanf	WH 2013/14	23,3	3,9	0,003	0,3
	Hanf	SH 2014	2,2	0,4	0,000	0,0
	Hanf	WH 2014/15	12,3	2,0	0,001	0,3
	<b>Summe</b>		<b>37,8</b>	<b>6,3</b>	<b>0,004</b>	<b>0,6</b>
Lys. 30	Hanf	WH 2013/14	24,5	2,5	0,004	0,2
	Hanf	SH 2014	3,2	0,4	0,001	0,0
	Hanf	WH 2014/15	25,6	3,0	0,000	0,5
	<b>Summe</b>		<b>53,3</b>	<b>5,9</b>	<b>0,006</b>	<b>0,8</b>
Lys. 116	Hanf	WH 2013/14	0,0	0,0	0,000	0,0
	Hanf	SH 2014	0,0	0,0	0,000	0,0
	Hanf	WH 2014/15	7,7	4,5	0,002	0,4
	<b>Summe</b>		<b>7,7</b>	<b>4,5</b>	<b>0,002</b>	<b>0,4</b>
Lys. 117	Hanf	WH 2013/14	0,0	0,0	0,000	0,0
	Hanf	SH 2014	0,0	0,0	0,000	0,0
	Hanf	WH 2014/15	19,0	7,9	0,010	1,6
	<b>Summe</b>		<b>19,0</b>	<b>7,9</b>	<b>0,010</b>	<b>1,6</b>
Lys. 20	Schwarzbrache	WH 2013/14	183,4	52,0	0,048	4,1
	Schwarzbrache	SH 2014	128,4	48,1	0,002	2,8
	Schwarzbrache	WH 2014/15	188,5	100,7	0,080	3,6
	<b>Summe</b>		<b>460,7</b>	<b>186,7</b>	<b>0,129</b>	<b>9,6</b>
Lys. 107	Schwarzbrache	WH 2013/14	150,0	68,3	0,022	2,5
	Schwarzbrache	SH 2014	131,6	68,9	0,019	2,9
	Schwarzbrache	WH 2014/15	184,6	94,9	0,068	3,1
	<b>Summe</b>		<b>428,2</b>	<b>216,7</b>	<b>0,101</b>	<b>7,7</b>
Lys. 21	Mais	WH 2013/14	44,7	22,3	0,004	1,5
	Zuckerrüben	SH 2014	0,5	0,3	0,000	0,0
	Winterweizen	WH 2014/15	6,9	1,1	0,000	0,1
	<b>Summe</b>		<b>52,1</b>	<b>23,7</b>	<b>0,005</b>	<b>1,6</b>
Lys. 22	Mais	WH 2013/14	51,2	25,8	0,009	1,2
	Zuckerrüben	SH 2014	0,5	0,2	0,000	0,0
	Winterweizen	WH 2014/15	41,9	7,1	0,002	0,7
	<b>Summe</b>		<b>93,6</b>	<b>33,1</b>	<b>0,012</b>	<b>1,9</b>
Lys. 25	Ölrettich	WH 2013/14	16,0	0,4	0,004	0,3
	Mais	SH 2014	26,5	0,5	0,001	0,4
	ZR ab Mrz 15	WH 2014/15	85,5	10,7	0,010	1,5
	<b>Summe</b>		<b>128,0</b>	<b>11,5</b>	<b>0,015</b>	<b>2,2</b>
Lys. 26	Ölrettich	WH 2013/14	53,8	1,2	0,006	1,1
	Mais	SH 2014	18,6	0,8	0,001	0,5
	ZR ab Mrz 15	WH 2014/15	43,7	5,7	0,003	0,7
	<b>Summe</b>		<b>116,1</b>	<b>7,7</b>	<b>0,010</b>	<b>2,3</b>

**Anhang 72: Faserkennwerte des Einfrierversuches**

	<i>Mittelwert</i>	<i>Median</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>
<i>Faserbreite [<math>\mu\text{m}</math>]</i>				
Ausgangssprobe	65,97	49,72	46,21	16665
1 Woche Frost	58,60	45,17	40,33	23446
1 Woche Frost-Tau	55,75	42,83	38,18	13258
4 Wochen Frost	59,30	45,83	41,92	19668
4 Wochen Frost-Tau	55,26	42,03	36,74	16878
<i>Bruchdehnung [%]</i>				
Ausgangssprobe	2,46	2,37	0,89	80
1 Woche Frost	2,55	2,46	0,94	80
1 Woche Frost-Tau	1,82	1,64	0,77	66
4 Wochen Frost	2,19	2,16	0,94	80
4 Wochen Frost-Tau	2,20	1,99	0,83	66
<i>Zugfestigkeit [MPa]</i>				
Ausgangssprobe	685,91	627,62	418,88	80
1 Woche Frost	513,47	385,54	422,74	80
1 Woche Frost-Tau	266,07	224,83	187,39	66
4 Wochen Frost	415,25	346,28	291,35	80
4 Wochen Frost-Tau	373,60	363,59	163,99	66
<i>Zugmodul [MPa]</i>				
Ausgangssprobe	24346,67	23415,99	11814,82	80
1 Woche Frost	16623,34	13069,70	11798,09	80
1 Woche Frost-Tau	13398,15	12149,74	6630,08	66
4 Wochen Frost	17281,76	16385,91	8417,79	80
4 Wochen Frost-Tau	15227,81	14719,21	7049,90	66

**Anhang 73: Signifikanzniveaus der Faserkennwerte, Einfrierversuch**

<i>Testvariable</i>	<i>Ausgangssprobe - 1 W. Frost</i>	<i>Ausgangssprobe - 1 W. Frost-Tau</i>	<i>Ausgangssprobe - 4 W. Frost</i>	<i>Ausgangssprobe - 4 W. Frost-Tau</i>	<i>1 W. Frost- 1 W. Frost-Tau</i>	<i>4 W. Frost- 4 W. Frost-Tau</i>	<i>1 W. Frost - 4 W. Frost</i>	<i>1 W. Frost-Tau - 4 W. Frost-Tau</i>	<i>1 W. Frost - 4 W. Frost-Tau</i>	<i>1 W. Frost-Tau- 4 W. Frost</i>	<i>n</i>
Faserbreite <sup>(x)</sup>	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	0,022	0,862	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	13258
Zugfestigkeit <sup>(x)</sup>	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	0,301	$\leq 0,001$	0,345	$\leq 0,001$	66
Zugmodul <sup>(x)</sup>	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	0,324	0,197	0,189	0,070	0,876	0,003	66
Bruchdehnung <sup>(x)</sup>	0,640	$\leq 0,001$	0,037	0,040	$\leq 0,001$	0,782	0,007	0,003	0,010	0,006	66



**Anhang 74: Beginnende Samenreife am Standort Lärz, 24. 09.2013 und am Standort Vermold 17.09.2013 (eigene Aufnahme)**



**Anhang 75: Froströste, Winteranbau 2013/14 (eigene Aufnahme)**





**Anhang 76: Mähen des Hanfstroh im Frühjahr (Aufnahme: J. Klack)**



**Anhang 77: Gepresste Hanfstrohballen im Frühjahr (Aufnahme: J. Klack)**







## Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis eines Praxisversuchs mit vielen Kooperationspartnern, ohne deren Mitwirkung und Enthusiasmus für den Anbau von Faserhanf kein wissenschaftliches Projekt entstanden wäre. Mein herzlicher Dank gilt daher allen denen, die für den Anbau von Hanf über den Winter brennen, mich bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt haben und auch über das Projekt hinaus noch daran weiterarbeiten.

Dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, sowie der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe danke ich für die Finanzierung des Projektes „Hanf als Winterzwischenfrucht“ (Förderkennzeichen: 22015811).

Professor Jörg Rinklebe danke ich für die Möglichkeit, dieses Projekt zu bearbeiten.

Vielen Dank für die praktische Umsetzung, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre, an die kooperierende Agrargenossenschaften Lärz-Krümmel, insbesondere an die Ansprechpartner Joachim Gawlick und Jörg Geistlinger. Ein großes Dankeschön gilt dem Landwirt Joachim Klack, der neben dem praktischen Hanfanbau, dem Projekt so viel Herzblut beigelegt hat. Gedankt sei auch seiner Familie für die Gastfreundlichkeit und Versorgung während der Feldarbeit.

Professor Ralph Meißner danke ich für die Begutachtung der Arbeit, sowie der Möglichkeit, den Hanfanbau auf der Lysimeterstation Falkenberg des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) durchzuführen. Den Mitarbeitern Holger Rupp, Robert Lüdtke und Melitta Stratschka bin ich für die praktische Umsetzung des Hanfanbaus auf den Lysimetern und der herzliche Atmosphäre an der Lysimeterstation zu Dank verpflichtet. Explizit noch ein Dankeschön an Holger Rupp für die wissenschaftliche Unterstützung bei der Datenauswertung und das offene Ohr für Fragen.

Ebenso danke ich Heiko Beckhaus von der Nettle Fibre Company GmbH für die Aufbereitung der Hanffasern und Uwe Weber von der Firma Polyvlies für die Fertigungsversuche.

Ich bedanke mich bei Professor Jörg Müssig und Nina Graupner für die Durchführung der Faseranalysen an der Fachhochschule Bremen, sowie für die moralische Unterstützung während des Projektes.

Christian Ahl und Peter Gernandt danke ich für die unkonventionelle Möglichkeit die Stickstoffbestimmung am Department für Agrarpädologie der Georg-August-Universität Göttingen durchführen zu können. Ebenso Dankeschön an die technischen Assistentinnen Karin Schmidt und Anita Kriegel für die schnelle Analyse.

Ich danke Florian Seufzer, Daniel Theiß, Marcel Imielski, Kai Dankowski und insbesondere Philip Trewer für die Mitwirkung an den Boden- und Pflanzenbeprobungen im Feld sowie Labor. Lieben Dank auch für die vielen kurzweiligen Autofahrten zu den Versuchsflächen.

Felix Schröter und Christoph Elpe danke ich für die Unterstützung bei den mikroskopischen Aufnahmen und für ihre Geduld bei der „Suche nach der Nadel im Heuhaufen“.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Claus Vandenhirtz für die Unterstützung bei den Labormessungen und bei Melanie Sichelschmidt für die Bewältigung der verwaltungstechnischen Aufgaben. Ebenso für die aufmunternden Worte und moralische Unterstützung.

Des Weiteren gibt es so viele Menschen, die hier nicht namentlich erwähnt sind, jedoch sehr zum reibungslosen Ablauf der praktischen Arbeit beigetragen haben, wie z.B. die freundlichen Mitarbeiterinnen der Verwaltung der Universität Wuppertal, für die schnelle Bearbeitung von Beschaffungs- und Reiseanträgen. Den engagierten Angestellten der Autovermietung, dem hilfsbereiten Nachbar, der uns den Pürckhauerhammer während der Feldprobung repariert hat und dem herzlichen Team des Mecklenburger Hofes in Mirow, das uns während der Feldbeprobungen in Lärz ein „Zuhause“ gegeben hat und vielen, vielen mehr...

Besonderer Dank gilt auch allen lieben Freunden, die immer ein offenes Ohr für mich hatten und für mich da waren.

Ganz lieben Dank an meine Eltern, die mich auf meinem Weg begleitet haben und immer hinter mir standen.

Mein allergrößter Dank gilt jedoch meinem Mann, ohne dessen Unterstützung ich diese Arbeit nicht angefangen, durchgehalten und beendet hätte. Danke, danke, danke. Ich freue mich auf die Zeit „danach“....



