FLSF-Projekt RoboFilz - der Halbzeitstand

Referent: Dr. Jörg Morhard
Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, Stuttgart

Inhalt des Beitrages

Zusammenfassung.....Seite 19
1 Einleitung.....Seite 19
2 Material und Methoden.....Seite 19
3 Ergebnisse und Diskussion .....Seite 21
4 Quellen .....Seite 27

Dr. Jörg Morhard

Universität Hohenheim
Institut für Agrartechnik
Garbenstraße 9
D-70599 Stuttgart

Fon +49 (0)711 459 22860
Fax +49 (0)711 459 22519

E-Mail: joerg.morhard@uni-hohenheim.de

Kurzbiographie

1997	Abschluss des Studiums der Allgemeinen Agrarwissenschaften. Diplom-Agraringenieur (Universität Hohenheim) Thema der Diplomarbeit: „Einfluss von Artenzusammensetzung, Schnitthöhe und Bewässerungsart auf den Wasserverbrauch von Intensivrasen"
1998	Fachberater für Rasen (Force Limagrain GmbH, Darmstadt)
1999 - 2002	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim, Stuttgart (Fachgebiet Verfahrenstechnik für Intensivkulturen)
2004	Promotion zum Dr. sc. agr. am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim, Stuttgart (Fachgebiet Verfahrenstechnik für Intensivkulturen) Thema: „Untersuchungen zur Bodenbearbeitung auf Strapazierrasenflächen"
2002 - 2006	Wiss. Mitarbeiter am Institut für Pflanzenbau und Grünland der Universität Hohenheim, Stuttgart (Fachgebiet Grünland und Futterbau). Maßgebliche Beteiligung am Aufbau und an der fachlichen Leitung der Rasen-Fachstelle (2003-2013)
Seit 2006	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim, Stuttgart (Fachgebiet Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion)

Zusammenfassung

Mähroboter stehen im Verdacht, durch den Verbleib des Schnittguts auf der Fläche, die Rasenfilzbildung zu begünstigen. Die vorliegenden Ergebnisse des Projektes „RoboFilz" zeigen, bezogen auf das erste Versuchsjahr, diesbezüglich keine besorgniserregenden Entwicklungen. Auf einem auf Oberboden angelegten Rasenversuchsfeld der Universität Hohenheim kann nicht einmal von Tendenzen gesprochen werden. Auf einem Fußballplatz mit sandreicher Rasentragschicht sind zwar Unterschiede erkennbar, diese jedoch sehr gering. Die Werte der Mähroboter-Variante lagen an den Messterminen meist nur weniger als 1 mm über denen der Kontrolle. Mechanische Gegenmaßnahmen könnten somit Abhilfe schaffen. Der Scherwiderstand wurde sowohl mit einem Stollenschergerät als auch mit einer Flügelsonde bestimmt. Die Werte liegen in einem ähnlichen Bereich wie die Messungen von HOLZINGER (2011). Während mit dem Stollenschergerät beim Mähroboter, im Vergleich zur Kontrolle in der Regel geringere Werte gemessen wurden, war es bei der Flügelsonde umgekehrt. Über die Ursachen kann momentan nur spekuliert werden. Alle Mittelwerte lagen in dem von der DFL empfohlenen Bereich von ≥ 60 kPa für Messungen mit einer Flügelsonde (DFL, 2018). Bei Betrachtung der Standardabweichungen werden bislang jedoch kaum statistisch signifikante Unterschiede erwartet.

1 Einleitung

Es besteht die Sorge, dass durch den Einsatz von Mährobotern auf Sportplätzen gegebenenfalls ein nicht zu beherrschendes Filzproblem entstehen kann. Als Ursache wird der Verbleib des Schnittguts auf der Fläche betrachtet. Ziel des Projektes ist deshalb eine Untersuchung des Filzaufbaus und seiner Auswirkungen in Abhängigkeit vom Mähsystem und der Art des Untergrunds. Verglichen wird der Mähroboter vom Typ Bigmow Connected Line, von Belrobotics, gegenüber einem herkömmlichen Sichelmäher mit Schnittgutaufnahme. Die Untersuchungen finden sowohl auf einem eigens angelegten Rasenversuchsfeld als auch auf einem im Spielbetrieb befindlichen Sportplatz statt. Die Laufzeit des Projektes beträgt 2 Jahre, bis Ende 2022. Die Finanzierung erfolgte durch den Fördererkreis Landschafts- und Sportplatzbauliche Forschung e.V. Die Mähroboter werden von Belrobotics für die Versuchslaufzeit gestellt.

2 Material und Methoden

2.1. Versuchsflächen

Die Untersuchungen werden auf einer Rasenfläche an der Versuchsstation der Universität Hohenheim, Stuttgart und auf einem kommunalen Sportplatz in Filderstadt durchgeführt.

2.1.1. Rasenversuchsfeld Universität Hohenheim

Im Jahr 2019 wurde auf dem Gelände der Versuchsstation Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim, Stuttgart, eine Rasenfläche für dieses Projekt neu angelegt (Abb. 1). Als Basis diente zuvor landwirtschaftlich genutzter sandig-lehmiger Oberboden. Deshalb wird angenommen, dass die Fläche eine ausreichend hohe mikrobielle Aktivität aufweist. In Bezug auf die Filzbildung soll dies das Verhalten eines einfach aufgebauten älteren Rasenspielfeldes abbilden.

Für die Etablierung der Grasnarbe wurden 4 verschiedene Saatgutmischungen mit jeweils zwei Wiederholungen angesät. Auf diese Weise lässt sich der Einfluss verschiedener Grasarten auf den Filzaufbau unter den beiden Mähsystemvarianten beobachten. Im vorliegenden Beitrag wurde jedoch nicht nach Mischungen differenziert ausgewertet, sondern die Mischungsvarianten als Wiederholungen der jeweiligen Mähsystemvariante zugeschlagen.

Für die Versuche wurde das gesamte Rasenversuchsfeld (87 m x 19,2 m) in zwei Hälften aufgeteilt. Eine Hälfte wird konventionell gemäht, wobei ein Sichelmäher mit Schnittgutaufnahme zum Einsatz kommt. Die organische Substanz des Schnittguts wird somit entfernt. Die andere Hälfte wird vom Mähroboter geschnitten, so dass das Schnittgut auf der Fläche verbleibt. Die technische Schnitthöhe beträgt hier 40 mm, während die tatsächliche Schnitthöhe, unabhängig vom Mähsystem, 50 mm beträgt. Innerhalb jeder Hälfte befinden sich für die Messungen 8 markierte permanente Testflächen von je 2 m x 4 m.

Abb. 1 Das Rasenversuchsfeld in der Versuchsstation Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim. Im Vordergrund der Mähroboter vom Typ Bigmow Connected Line.

2.1.2. Rasenspielfeld Filderstadt

Als zweite Versuchsfläche dient ein neu gebauter Fußballplatz mit einer sandreichen Rasentragschicht nach DIN 18035/4 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2018). Sie befindet sich in D-70794 Filderstadt, ca. 10 km von der Universität entfernt. Hier werden die Versuche unter Spielbedingungen durchgeführt. Es wird angenommen, dass die mikrobielle Aktivität auf dem neu gebauten Platz noch wenig entwickelt ist, was zu einer höheren Filzbildung führen könnte.

Für die Versuche wurde das Feld ebenfalls in zwei Hälften geteilt. Eine Hälfte wird konventionell mit einem Sichelmäher mit Schnittgutaufnahme gemäht. Die organische Substanz des Schnittguts wird entfernt. Die andere Hälfte wird vom Mähroboter geschnitten, so dass das Schnittgut auf der Fläche verbleibt. Der Mähroboter wurde im August 2020 installiert. Die technische Schnitthöhe des Roboters beträgt 20 mm, während die tatsächliche Schnitthöhe, unabhängig vom Mähsystem, 30 mm beträgt. Innerhalb jeder Hälfte befinden sich für die Messungen 4 markierte Dauerquadrate von je 4 m x 4 m. Die Lage der Dauerquadrate entlang der Mittelachse und in den Randbereichen des Spielfelds soll unterschiedliche Belastungsintensitäten abbilden. Im vorliegenden Beitrag wurde jedoch nicht nach den Positionen der Dauerquadrate differenziert ausgewertet, sondern die einzelnen Positionen als Wiederholungen der jeweiligen Mähsystemvariante zugeschlagen.

2.2. Messungen

Die nachfolgend beschriebenen Messungen wurden meist in monatlichem Abstand durchgeführt. Dargestellt ist das Versuchsjahr 2021. Die gemessenen Parameter waren neben der Filzstärke, der Scherwiderstand, gemessen mit einem Stollenschergerät und der Scherwiderstand, gemessen mit einer Flügelsonde. Der Scherwiderstand ist ein wichtiger Parameter für die Bespielbarkeit und die Belastbarkeit eines Fußballfeldes. Er wird durch das Vorhandensein von Filz beeinflusst. Begleitend zu den Messungen des Scherwiderstandes wurde die Bodenfeuchte mit einer TRIME TDR-Sonde aufgezeichnet, um den Einfluss des Bodenwassergehaltes auf die Ergebnisse bewerten zu können.

2.2.1. Filzstärke

Die Stärke der Filzschicht wurde in Anlehnung an die Norm EN 12232:2003 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2003) bestimmt. Pro Parzelle wurden mit einem Profilspaten 4 Proben entnommen. Jede Probe wurde an drei Stellen gemessen und daraus der Mittelwert berechnet.

2.2.2. Scherwiderstand - Stollenschergerät

Da eine exakte Messung von Rasenfilz auf Grund der Abbauzonen mit Schwierigkeiten verbunden ist, ist es sinnvoll, die direkte Messung durch Bestimmung seiner Auswirkungen zu ergänzen (STÜRMER-STEPHAN und MORHARD, 2019). Für Spieler, Platzwarte oder Dienstleister sind diese Auswirkungen meist noch wichtiger als die exakte Dicke der Filzschicht. Der Scherwiderstand ist ein wichtiger Faktor für die Stabilität von Spielflächen für Sportarten wie Fußball. Er hängt hauptsächlich von der Pflanzendecke, aber auch von Bodenparametern ab (TOBIAS, 1991). Es ist anzunehmen, dass er durch Rasenfilz negativ beeinflusst wird. Der Scherwiderstand der Oberfläche wurde mit einem selbstgebauten Stollenschergerät nach EN 15301-1:2007 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2007) bestimmt (Abb. 2). Die Stollenkörper mit sechs Stollen von je 13 mm Länge besitzt ein Gewicht von 80 kg. Um das maximale Drehmoment, das für die Torsion erforderlich ist, bestimmen zu können, wird ein Drehmomentsensor verwendet. Der auf diese Weise oberflächennah gemessene Scherwiderstand wird dreimal pro Parzelle gemessen, das heißt, auf dem Rasenversuchsfeld 24-mal pro Mähsystemvariante und auf dem Rasenspielfeld in Filderstadt 16-mal pro Mähsystemvariante.

Abb. 2 Scherstollengerät-Eigenbau nach EN 15301-1:2007 auf dem Rasenversuchsfeld in der Versuchsstation Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim.

2.2.3. Scherwiderstand - Flügelsonde

Der Flügelscherversuch wurde mit einer Geonor-Flügelsonde vom Typ H-60 mit einer Flügelgröße von 20 x 40 mm ebenfalls in situ durchgeführt. Pro Parzelle wurde an 9 Stellen beprobt. Da die Flügel der Sonde tiefer in den Boden eindringen als die Stollen, bilden die Ergebnisse nicht nur den Einfluss der Filzschicht, sondern hauptsächlich den des darunter liegenden Bodens, einschließlich der Wurzeln und Rhizome der Gräser ab. Als eine ausreichende Scherfestigkeit gilt ein Messwert von ≥ 60 kPa (DFL, 2018).

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1. Rasenversuchsfeld Universität Hohenheim

Für die Darstellung im vorliegenden Beitrag wurde auf eine Differenzierung nach Saatgutmischungen verzichtet. Das bedeutet, dass die Daten das arithmetische Mittel der Einzelwerte über die 4 Ansaatmischungen und 2 Wiederholungen sowie der entsprechenden Standardabweichung zeigen.

3.1.1. Filzschicht

Abbildung 3 zeigt die Entwicklung der Filzstärke im Beobachtungszeitraum. Die durchschnittliche Filzstärke der Mähsystemvarianten lag dabei zwischen 7 mm („Mähroboter" 16.07.21) und 15 mm („Sichelmäher Schnittgutaufnahme" 06.09.21). Generell nahm die Filzstärke vor allem im 3. Quartal stark zu. Durch die Anlage der Versuchsflächen auf anstehendem Oberboden wurde bei den einzelnen Messungen eine große Heterogenität beobachtet. Die Einzelmessungen zeigten Werte von 1 mm Filz bis hin zu mehr als 30 mm Filz. Betrachtet man die vorliegenden Daten, fallen die geringen Unterschiede und die hohen Standardabweichungen auf. Bezogen auf eine Mähsystemvariante wäre es deshalb fahrlässig, von Tendenzen oder gar einem Trend zu sprechen. Es ist daher bislang davon auszugehen, dass es auf den Parzellen in Hohenheim durch den Einsatz des Mähroboters gegenüber dem Sichelmäher mit Schnittgutaufnahme, keine erhöhte Filzbildung gegeben hat. Dies entspricht den Erwartungen, da angenommen wurde, dass die organische Substanz des in der Grasnarbe verbliebenen Schnittguts von den im Oberboden vorhandenen Mikroorganismen schnell abgebaut und mineralisiert wird. Die hohen Standardabweichungen können teilweise auch darauf zurückgeführt werden, dass die Ansaatmischungen in der vorliegenden Auswertung als Wiederholungen betrachtet wurden. So neigten die verschiedenen Mischungen in auffälligem Maß zu unterschiedlich starker Filzbildung. Als einzige mechanische Maßnahme im Beobachtungszeitraum wurde das gesamte Versuchsfeld vor Beginn der Messungen gestriegelt und das Material von der Fläche entfernt.

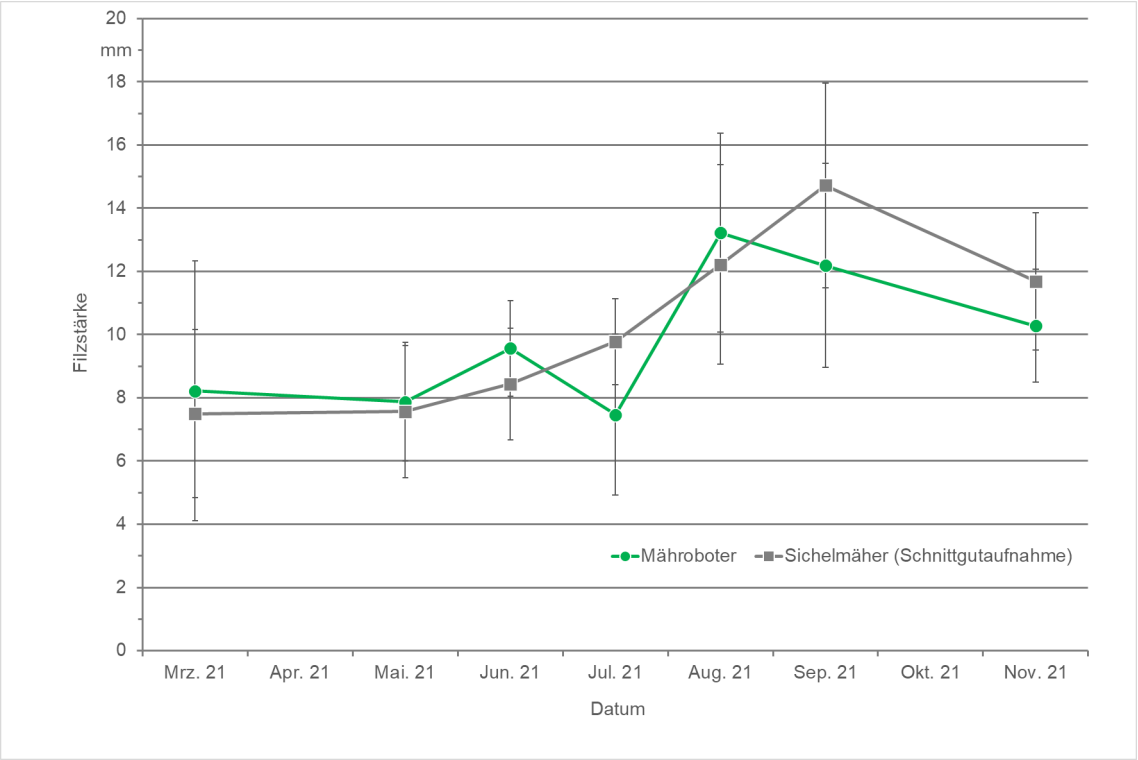

Abb. 3 Filzstärken auf dem Rasenversuchsfeld an der Universität Hohenheim in Abhängigkeit der Mähsystemvariante. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung n=8.

3.1.2. Scherwiderstand gemessen mit Stollenschergerät

Grundsätzlich folgten die Werte des Scherwiderstandes, gemessen mit dem Stollenschergerät, der zweigipfligen Wachstumskurve der Gräser (Abb. 4). Dabei waren sie bei der Variante Sichelmäher mit Schnittgutaufnahme im Vergleich zu den Mähroboter gemähten Flächen stets etwas höher. Ein Phänomen, das in Zukunft einen genaueren Blick wert ist. Ein möglicher Grund könnte sein, dass bis zu seinem vollständigen Abbau immer ein Teil des Schnittguts auf der Bodenoberfläche verbleibt. Auf diese Weise könnte es als Gleitschicht zwischen dem Stollenkörper des Schergerätes und dem Boden wirken. Im Beobachtungszeitraum lag kein Zusammenhang zwischen der Filzstärke und dem mit dem Stollenschergerät gemessenen Scherwiderstand vor.

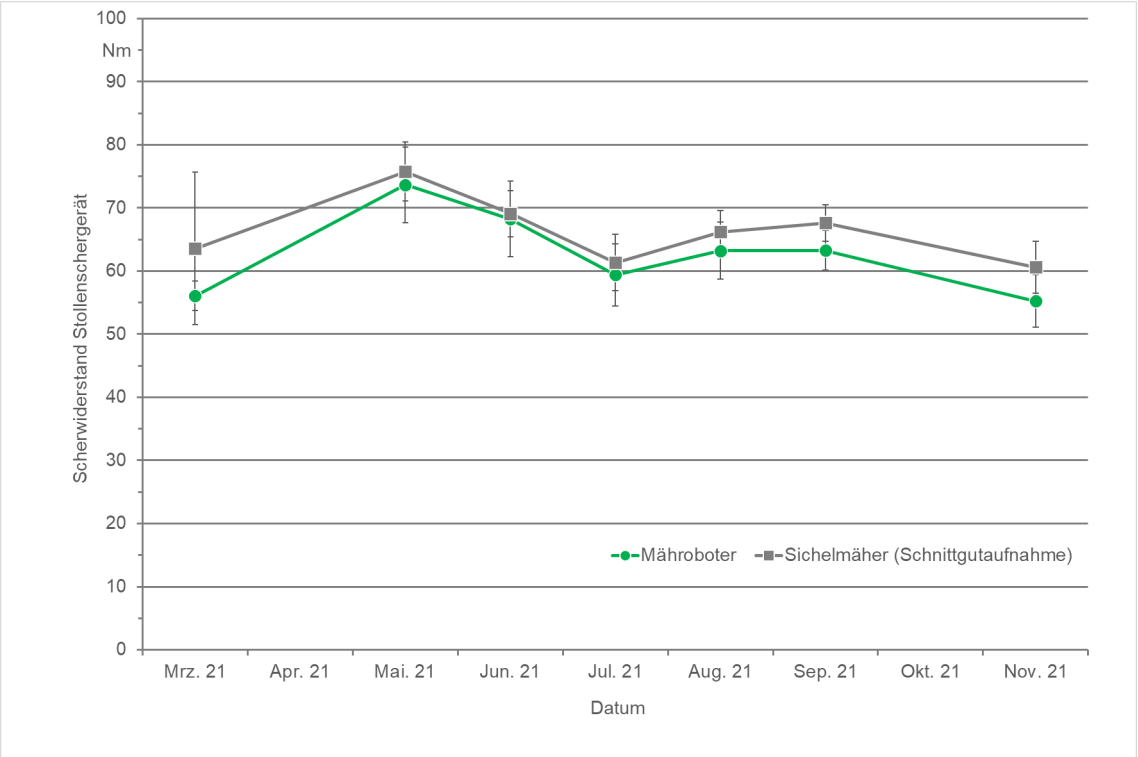

Abb. 4 Scherwiderstand, gemessen mit Stollenschergerät, auf dem Rasenversuchsfeld an der Universität Hohenheim in Abhängigkeit der Mähsystemvariante. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung n=8.

3.1.3. Scherwiderstand gemessen mit Flügelsonde

Der Scherwiderstand, gemessen mit der Flügelsonde, zeigte im Beobachtungszeitraum eine stetige Abnahme (Abb. 5). Der höchste Wert, mit durchschnittlich 106 kPa, wurde am 31.03.21 bei der Mähroboter-Variante beobachtet. Es ist interessant, dass bei diesem Messverfahren alle gemessenen Werte der Mähsystemvariante „Mähroboter" einen höheren Scherwiderstand aufweisen. Der Grund dafür wird in den oberen 40 mm des Bodens vermutet, konnte aber bisher nicht mit Sicherheit festgestellt werden. Ein Zusammenhang mit der Bodenfeuchtigkeit kann bei Betrachtung der vorliegenden Ergebnisse der TDR-Messungen bereits ausgeschlossen werden. Darüber hinaus wurde eine oberflächennahe Bodenverdichtung als Folge eines Multi-Pass-Effektes des sich nach dem Zufallsprinzip bewegenden Mähroboters in Betracht gezogen. Messungen des Eindringwiderstandes und eine Bestimmung der Trockenrohdichte auf den Flächen der Mähsystemvarianten zeigten jedoch keine Unterschiede, die zur Untermauerung dieser Hypothese geeignet wären (Die detaillierten Ergebnisse dieser Messungen sind nicht Teil des vorliegenden Beitrags). In Betracht gezogen werden könnte auch die Möglichkeit eines verbesserten Wurzelwachstums aufgrund der Schnittgutrückführung, ohne Belege dafür zu besitzen. Wenn sich der beobachtete Trend fortsetzen sollte, kann eine Analyse der Wurzelmasse zur Klärung beitragen.

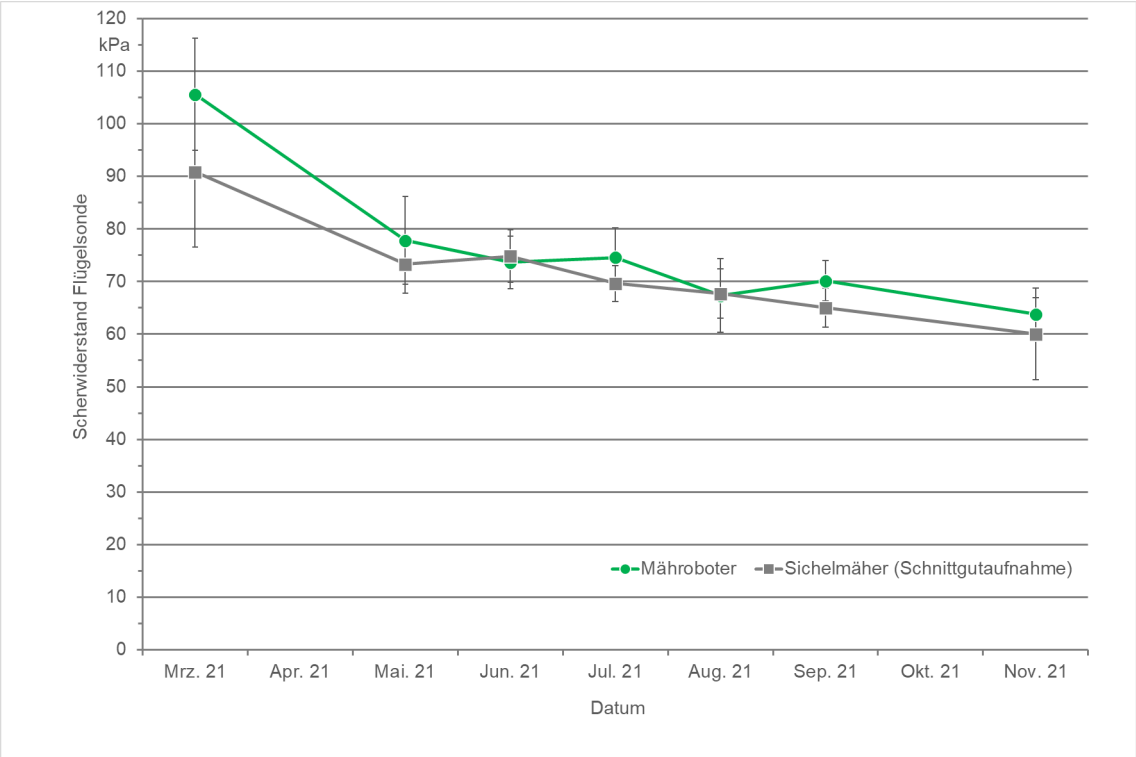

Abb. 5 Scherwiderstand, gemessen mit Flügelsonde, auf dem Rasenversuchsfeld an der Universität Hohenheim in Abhängigkeit der Mähsystemvariante. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung n=8.

3.2. Rasenspielfeld Filderstadt

Nachfolgend sind die Ergebnisse des 2019 neu gebauten Fußballplatzes in Filderstadt-Harthausen dargestellt. Im vorliegenden Beitrag wird nicht nach der Lage der Parzellen und damit nach Bereichen mit unterschiedlicher Belastung differenziert. Die jeweils vier Dauerquadrate für die Messungen jeder Mähsystemvariante wurden für die Darstellung als Wiederholungen gewertet.

3.2.1. Filzschicht

Die durchschnittliche Filzstärke der Mähsystemvarianten lag im dargestellten Zeitraum zwischen 10 mm zu Beginn des Beobachtungszeitraums und 14 bzw. 15 mm am Ende (Abb. 6). Die Einzelmessungen spiegelten eine Bandbreite von 5 mm bis 20 mm Filz wider. Generell nahm, vergleichbar den Beobachtungen am Standort Hohenheim, die Filzstärke vor allem im 3. Quartal deutlich zu. An 6 der insgesamt 7 Termine im Beobachtungszeitraum zeigte die Mähroboter Variante eine geringfügig stärkere Filzschicht. Die Unterschiede betrugen dabei jedoch weniger als 1 mm, abgesehen vom Wert am 11.06.21, mit einer Differenz von 1,6 mm. Betrachtet man die vorliegenden Daten, so ist aufgrund der geringen Unterschiede und der hohen Standardabweichung nicht damit zu rechnen, dass Signifikanzen vorliegen. Allenfalls lässt sich ein Trend erkennen, dem voraussichtlich durch zusätzliche mechanische Maßnahmen wie Striegeln oder Vertikutieren begegnet werden könnte. Vor Beginn der Messungen wurde der gesamte Platz bereits einmal gestriegelt und darüber hinaus am 21. September vertikutiert. In beiden Fällen wurde das Material von der Fläche entfernt. Die Maßnahme im September könnte für das anschließende Abflachen der Kurve und das abweichende Verhalten der mit dem Roboter gemähten Parzellen beim darauffolgenden Messtermin verantwortlich sein. Zwei Tiefenlockerungsmaßnahmen mit Vollzinken am 13.04.21 und am 27.09.21 werden ohne Einfluss auf die Filzstärke gewertet.

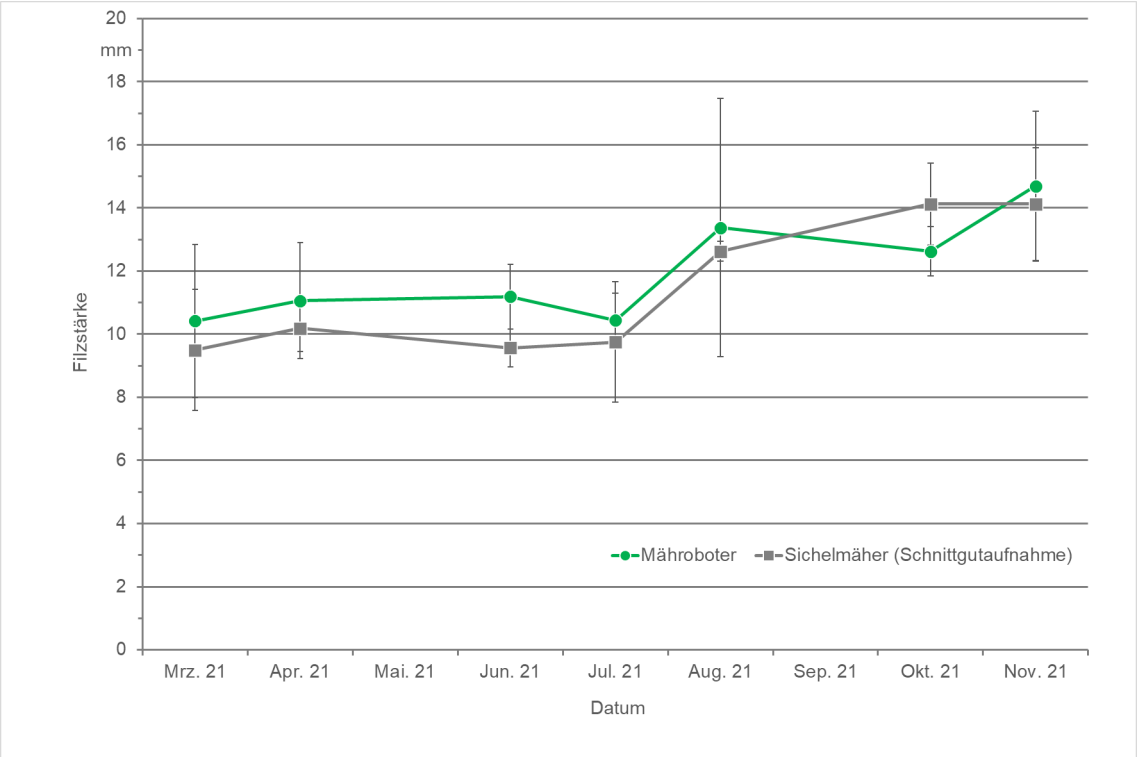

Abb. 6 Filzstärken auf dem Rasenspielfeld in Filderstadt in Abhängigkeit der Mähsystemvariante. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung n=4.

3.2.2. Scherwiderstand gemessen mit Stollenschergerät

Die Werte des Scherwiderstandes, gemessen mit dem Stollenschergerät, folgen annähernd der zweigipfligen Wachstumskurve der Gräser (Abb. 7). Innerhalb des Beobachtungszeitraums variieren die Werte von 61 Nm („Mähroboter" 30.08.21) bis 80 Nm („Sichelmäher Schnittgutaufnahme" 29.03.21 und 11.06.21). An allen Terminen lagen die Werte der Mährobotervariante unter denen des Sichelmähers mit Schnittgutaufnahme. Dieses Verhalten konnte, wenngleich weniger stark ausgeprägt, bereits auf dem Rasenversuchsfeld in Hohenheim beobachtet werden. Vor diesem Hintergrund ist es unwahrscheinlich, dass das Verhalten auf die geringfügigen Unterschiede in der Filzstärke zurückzuführen ist. Auch hier könnte eine Erklärung die bis zu ihrem vollständigen Abbau an der Oberfläche verbleibende organische Masse des Schnittguts sein. Signifikanzen sind hier ebenfalls nur für wenige Termine zu erwarten.

3.2.3. Scherwiderstand gemessen mit Flügelsonde

Während der Scherwiderstand, gemessen mit dem Stollenschergerät, die Situation in der Nähe der Oberfläche widerspiegelt, erfasst der Scherwiderstand, gemessen mit der Flügelsonde, den Bereich zwischen der Bodenoberfläche und 40 mm Tiefe. Die Werte des Scherwiderstandes, gemessen mit der Flügelsonde, variieren im Beobachtungszeitraum zwischen 62 kPa und 93 kPa (Abb. 8). Vergleichbar der Werte vom Rasenversuchsfeld in Hohenheim, liegen die Werte der Mähroboter Parzellen an allen Terminen über denen der Variante „Sichelmäher mit Schnittgutaufnahme". Gleichzeitig ist eine Abnahme des Scherwiderstandes über das Jahr zu beobachten. Eine mögliche Ursache dieser Beobachtungen wurde bereits diskutiert und könnte in einer unterschiedlichen Durchwurzelungsintensität der Gräser liegen. Ob allerdings das verbleibende Schnittgut als zusätzliche, langsam fließende Nährstoffquelle einen solchen Einfluss haben kann, muss vorerst ebenfalls offenbleiben. Auch wenn die Trends unter Hinzunahme der Ergebnisse vom Versuchsfeld in Hohenheim eindeutig erscheinen und die Standardabweichungen im vorliegenden Fall eher gering ausfallen, kann auch hier erst eine detaillierte statistische Auswertung mit einem passenden Modell zeigen, ob signifikante Unterschiede zwischen dem Mähroboter und dem Sichelmäher mit Schnittgutaufnahme bestehen. Eine wichtige Rolle werden dabei die Wiederholungen über die einzelnen Messtermine spielen, so dass vor einer abschließenden Auswertung das zweite Versuchsjahr noch abzuwarten ist.

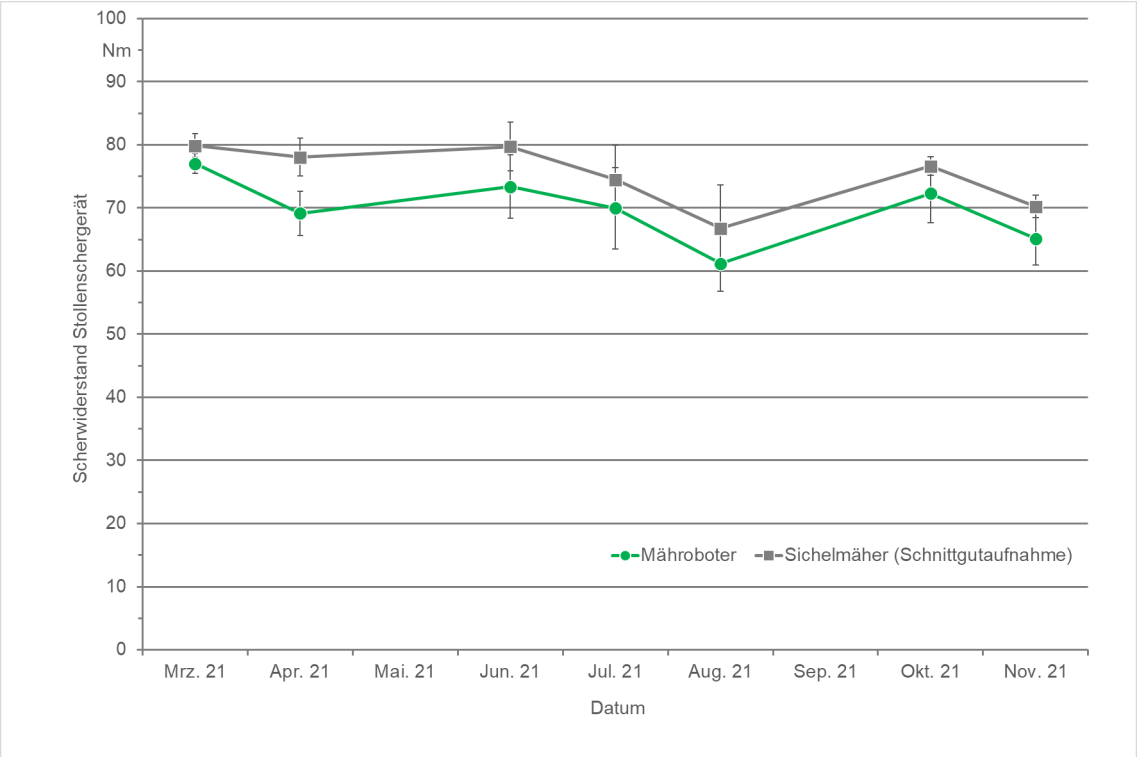

Abb. 7 Scherwiderstand, gemessen mit Stollenschergerät, auf dem Rasenspielfeld in Filderstadt in Abhängigkeit der Mähsystemvariante. Fehlerbalken zeigen Standardabw. n=4.

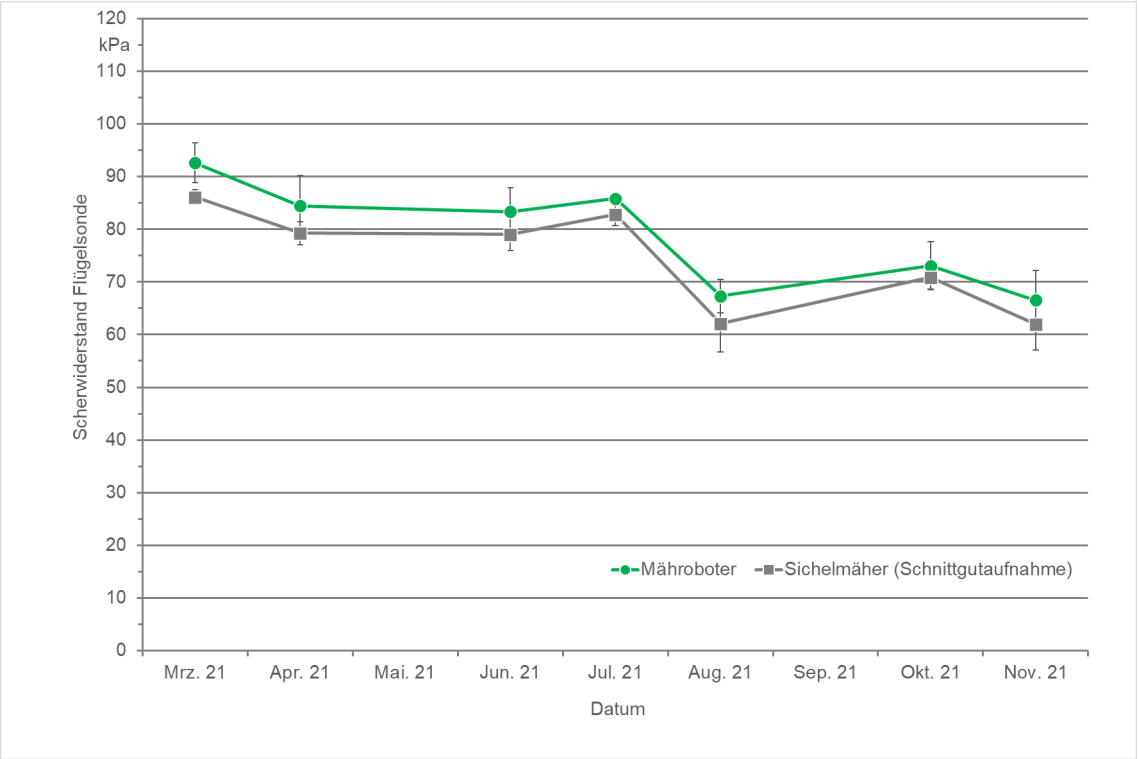

Abb. 8 Scherwiderstand, gemessen mit Flügelsonde, auf dem Rasenspielfeld in Filderstadt in Abhängigkeit der Mähsystemvariante. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung, n=4.

4 Quellen

DFL, 2018. Qualitätssicherung für Stadionrasen - Arbeitsbuch für das Greenkeeping, 3. Auflage, DFL Deutsche Fußball Liga GmbH, 60325 Frankfurt/Main.

Holzinger B., 2011. Scherfestigkeitsuntersuchungen auf Naturrasen-Sportplätzen. Masterarbeit zu Landschaftsplanung und Landschaftsarchitektur. BOKU Wien.

Deutsches Institut für Normung, 2003. DIN EN 12232: 2003-07, Sportböden - Bestimmung der Filzdicke bei Naturrasen (Deutsche Fassung EN 12232:2003).

Deutsches Institut für Normung, 2007. DIN EN 15301-1: 2007-06, Sportböden - Teil 1: Bestimmung des Drehwiderstandes (Deutsche Fassung EN 15301-1:2007).

Deutsches Institut für Normung, 2018. DIN 18035-4: 2018-12, Sportplätze - Teil 4: Rasenflächen.

Stürmer-Stephan, B. und J. Morhard, 2019. Rasenfilz – Ergebnisse einer Literaturauswertung. Z. Rasen-Turf-Gazon, 1/2019, S. 3-9.

Tobias, S., 1991. Bautechnisch nutzbare Verbundfestigkeit von Boden und Wurzel. Hochschulschrift, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Dissertation.