

Anlagenband

Schriftenreihe des LfULG, Heft 16/2016

Schalldämpfung durch Wald, Teil 1

Vegetationsabhängige Abschirmwirkung von Wäldern – Messtechnische Verifizierung eines akustisch-meteorologischen Modells

Anhang:

Weitere akustische und meteorologische Messungen,
Modellierungen sowie Ergebnisauswertung

Dr. Astrid Ziemann, Dr. Hans-Jörg Ederer, Christoph Stüber,
Markus Hehn, Prof. Dr. Christian Bernhofer

Inhalt

A	Messung der Bodenimpedanz.....	6
	Bodentyp „Nadelwald“	9
	Bodentyp „Laubwald“	10
	Bodentyp „Maisfeld“ (Stoppeln)	11
	Bodentyp „Weg“.....	12
	Bodentyp „Saat“.....	13
	Bodentyp „Schlamm“	14
B	Modellierung des Bodeneinflusses auf die Schallausbreitung	15
C	Auswertung von meteorologischen Messungen an Einzeltagen	18
D	Zusammenhang der tageszeitlichen Schwankungen von akustischen und meteorologischen Größen....	21
	Literaturverzeichnis.....	39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzip der Messanordnung zur Ermittlung der Bodenimpedanz	6
Abbildung 2: Typische Impulsantwort mit Direktschall und Bodenreflexion	6
Abbildung 3: Lage der Messorte zur Bestimmung der Bodenimpedanzen (Quelle: GeoSN).....	7
Abbildung 4: Messanordnung Bodentyp „Nadelwald“	9
Abbildung 5: Bodenoberfläche Bodentyp „Nadelwald“	9
Abbildung 6: Schallabsorptionsgrade für den Bodentyp „Nadelwald“	9
Abbildung 7: Messanordnung Bodentyp „Laubwald“	10
Abbildung 8: Bodenoberfläche Bodentyp „Laubwald“	10
Abbildung 9: Schallabsorptionsgrade für den Bodentyp „Laubwald“	10
Abbildung 10: Messanordnung Bodentyp „Mais“	11
Abbildung 11: Bodenoberfläche Bodentyp „Mais“	11
Abbildung 12: Schallabsorptionsgrade für den Bodentyp „Mais“	11
Abbildung 13: Messanordnung Bodentyp „Weg“	12
Abbildung 14: Bodenoberfläche Bodentyp „Weg“	12
Abbildung 15: Schallabsorptionsgrade für den Bodentyp „Weg“	12
Abbildung 16: Messanordnung Bodentyp „Saat“	13
Abbildung 17: Bodenoberfläche Bodentyp „Saat“	13
Abbildung 18: Schallabsorptionsgrade für den Bodentyp „Saat“	13
Abbildung 19: Messanordnung Bodentyp „Schlamm“	14
Abbildung 20: Bodenoberfläche Bodentyp „Schlamm“	14
Abbildung 21: Schallabsorptionsgrade für den Bodentyp „Schlamm“	14
Abbildung 22: Relativer Schallpegel zur Bestimmung des akustischen Bodeneinflusses	16
Abbildung 23: Dämpfung durch den Bodeneffekt im Waldgebiet und Abhängigkeit von der Entfernung.....	17
Abbildung 24: Tagesgang der mittleren Schalltemperatur und horizontalen Windgeschwindigkeit am 19.10.2014 in verschiedenen Höhen.....	18
Abbildung 25: Tagesgang der vertikalen Gradienten der mittleren Schallgeschwindigkeit und horizontalen Windgeschwindigkeit am 19.10.2014 in verschiedenen Höhen.....	19
Abbildung 26: Tagesgang der mittleren Schalltemperatur und horizontalen Windgeschwindigkeit am 19.03.2015 in verschiedenen Höhen.....	20
Abbildung 27: Tagesgang der vertikalen Gradienten der mittleren Schallgeschwindigkeit und horizontalen Windgeschwindigkeit am 19.03.2015 in verschiedenen Höhen.....	20
Abbildung 28: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 19.10.2014	22
Abbildung 29: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 21.10.2014	23
Abbildung 30: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 24.10.2014	24
Abbildung 31: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 26.10.2014	25
Abbildung 32: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 27.10.2014	26
Abbildung 33: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 28.10.2014	27
Abbildung 34: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 30.10.2014	28
Abbildung 35: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 11.03.2015	29
Abbildung 36: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 13.03.2015	30

Abbildung 37: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 17.03.2015	31
Abbildung 38: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 18.03.2015	32
Abbildung 39: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 19.03.2015	33
Abbildung 40: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 20.03.2015	34
Abbildung 41: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 23.03.2015	35
Abbildung 42: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 24.03.2015	36
Abbildung 43: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 25.03.2015	37
Abbildung 44: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 27.03.2015	38

A Messung der Bodenimpedanz

Bei der akustisch-meteorologischen Modellierung wird die akustische Eigenschaft des Bodens üblicherweise als lokal reagierende Impedanz abgebildet, gekennzeichnet durch den Strömungswiderstand der Oberflächenstruktur. Vereinfachend kann diese als poröser Absorber durch den Schallabsorptionsgrad beschrieben werden, der definiert ist als das Verhältnis der absorbierten (d. h. nicht reflektierten) Schalleistung zu der auf die Fläche eingefallenen Schalleistung. Zu deren Bestimmung existieren verschiedene Vorgehensweisen. Für Messungen an Oberflächen außerhalb von Räumen ist die Impulsmessmethodik besonders gut geeignet. Dabei kann der Schallabsorptionsgrad aus dem Reflexionskoeffizienten entsprechend der Pegelverhältnisse der einfallenden und reflektierten Welle berechnet werden (Abbildung 2). Bewährt hat sich eine Messanordnung in einem gleichseitigen Dreieck (Abbildung 1). Dabei wird der Direktschall jeweils direkt mitgemessen, wobei dessen Laufzeit idealerweise genau die Hälfte der Laufzeit der Reflexion annimmt (Abbildung 2). Das Ergebnis ist der Schallabsorptionsgrad für ebene Wellen für den Einfallswinkel 60° .

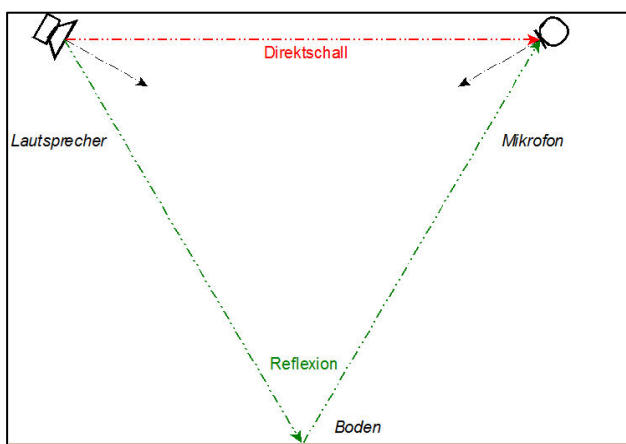


Abbildung 1: Prinzip der Messanordnung zur Ermittlung der Bodenimpedanz

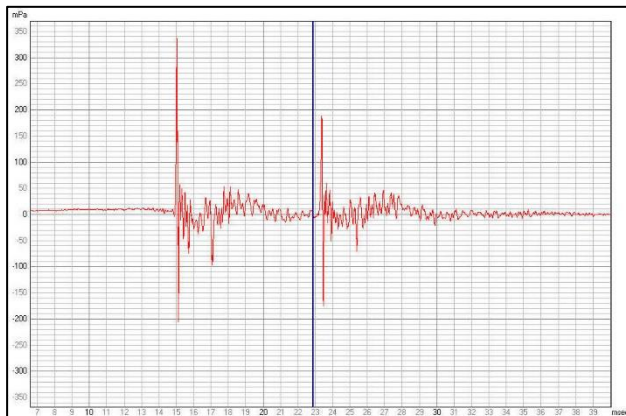


Abbildung 2: Typische Impulsantwort mit Direktschall und Bodenreflexion

Für diese Messungen wurde das computergestützte Korrelationsmesssystem (AFMG Technologies, Berlin: „Easera V1.1.3“) genutzt. Die auswertbaren Messergebnisse dieses Systems sind breitbandige Impulsantworten in Form digital abgetasteter Amplituden-Zeit-Funktionen. Zu deren Ermittlung werden vom Messsystem signaloptimierte Anregungssequenzen erzeugt, digital-analog gewandelt und durch einen Lautsprecher zur Anregung des Messobjekts ausgegeben. Das primäre Antwortsignal des Messobjekts wird gleichzeitig

mittels eines Mikrofons wieder aufgenommen, analog-digital gewandelt und zwischengespeichert. Durch eine Rückfaltung des Antwortsignals mit der bekannten Anregungssequenz entsteht als eigentliches Messergebnis die Impulsantwort, die für ein im Messzeitraum konstantes Ausbreitungsmedium nahezu identisch ist mit der Gewichtsfunktion des Messobjektes. Diese enthält systemtheoretisch begründet alle Informationen zum Übertragungsverhalten der gewählten Sender-Empfänger-Kombination.

Weil es sich um ein getastetes (digitales) Messsystem handelt, wird der gültige Frequenzbereich durch das Abtasttheorem definiert. Folgende Systemeinstellungen wurden verwendet:

Anregung	Ordnung 16	N = 65.536 Abtastwerte
	mit Abtastfrequenz	$f_a = 48,0$ kHz
	Mittelung	ohne
	Anregungssequenz	logarithmischer Sweep

berechnete Raumimpulsantwort

Antialiasingfilter	$f_g = 24$ kHz
Zeitfenster	$t_i = 1,365$ s
Zeitauflösung	$dt = 20,8$ μ s.

Die Auswertung erfolgte über eine Zeitfensterung von je 21,33 ms (= 1.024 Abtastwerte) als Terzanalyse zwischen 65 Hz und 10 kHz.

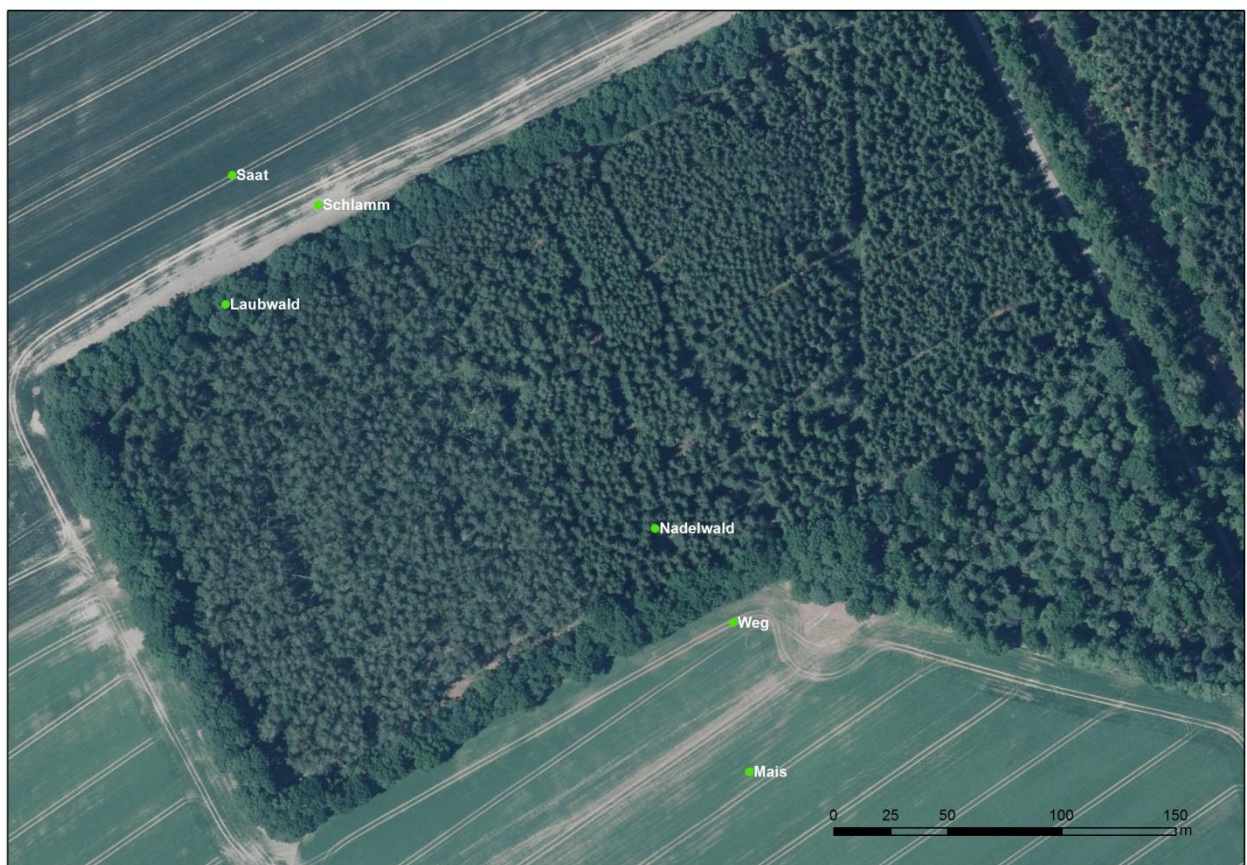


Abbildung 3: Lage der Messorte zur Bestimmung der Bodenimpedanzen (Quelle: GeoSN)

Im Modul 1 (03.11.2014 zwischen 13 und 16 Uhr MEZ) wurden Daten für alle Bodenarten erhoben, die von den Schallpfaden der Schallausbreitungsmessungen berührt wurden (Abbildung 3):

- Nadelwald
- Laubwald
- Maisfeld (Stoppeln mit starker Spreuauflage)
- Fahrstreifen (Maisfeld, feste Erdoberfläche)
- Saat (weitgehend trockenes Feld mit lockerer Bodenkrume und aufgehender Saat)
- Schlamm (sehr feuchter Feldstreifen im nördlichen Anschluss an den Wald)

Die meteorologischen Bedingungen während der ergänzenden Messungen entsprachen weitgehend denen der Hauptmessungen, sodass die daraus abgeleiteten Parameter als für die Messpfade typisch angesehen werden können. Der Wind wehte jeweils nur sehr gering (< 2 m/s) aus südwestlicher Richtung, sodass auch diesbezüglich keine Bevorzugung einer bestimmten Messrichtung vorlag.

Es wurden Daten für alle Bodenarten erhoben, die von den Schallpfaden der Schallausbreitungsmessungen berührt wurden:

- Nadelwald (Abbildung 4)
- Laubwald (Abbildung 7)
- Abgeerntetes Maisfeld „Mais“ (Stoppeln mit starker Spreuauflage [Abbildung 10])
- Fahrstreifen „Weg“ (Maisfeld, feste Erdoberfläche mit leichtem Grasbewuchs [Abbildung 13])
- Saat (weitgehend trockenes Feld mit lockerer Bodenkrume und aufgehender Saat [Abbildung 16])
- Schlamm (sehr feuchter Feldstreifen im nördlichen Anschluss an den Wald [Abbildung 19])

Dabei wurden jeweils mindestens zwei 90° zueinander gedrehte Messrichtungen verwendet, um Effekte, die nur aus der Bodentextur resultieren, beurteilen zu können.

Bodentyp „Nadelwald“

Untersucht wurden zwei Bodenflächen im Bereich einer Lichtung nahe dem südlichen Wegende. Messungen im Bestand sind wegen des starken Einflusses gestreuter Schallanteile des umgebenden Bewuchses weniger aussagefähig. Es handelt sich um einen weitgehend trockenen Boden mit einer Auflage aus trockenen Nadeln und Laub sowie dürren Ästen. Die Bodenoberfläche ist stark strukturiert (gefurcht) und steindurchsetzt. Der frequenzabhängige Verlauf des Schallabsorptionsgrades zeigt Abbildung 6. Er lässt den typischen schmalbandigen Effekt poröser Böden bei 400 Hz und die erwartungsgemäße Höhenabsorption der lockeren Bodenauflage erkennen. Der detaillierte Verlauf ist infolge der parallelen Oberflächenstrukturen stark richtungsabhängig.



Abbildung 4: Messanordnung Bodentyp „Nadelwald“



Abbildung 5: Bodenoberfläche Bodentyp „Nadelwald“

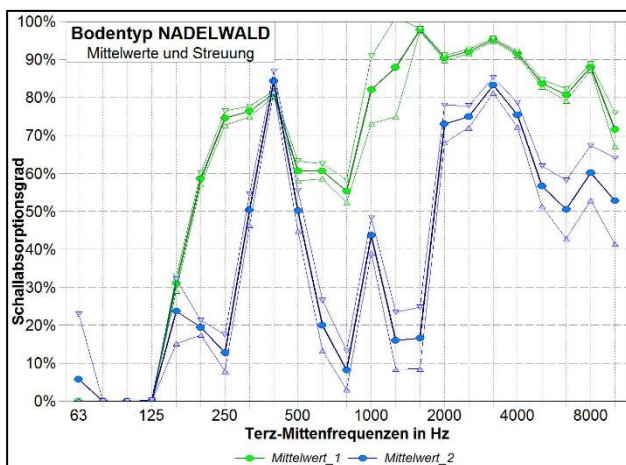


Abbildung 6: Schallabsorptionsgrade für den Bodentyp „Nadelwald“

Bodentyp „Laubwald“

Wegen der sehr starken Oberflächenstrukturierung (Pflanzfurchen) wurden drei Bodenflächen im Bereich des nördlichen Waldrandes untersucht. Messungen im Bestand sind wegen des starken Einflusses gestreuter Schallanteile der Baumstämme weniger aussagefähig. Es handelt sich um einen weitgehend trockenen Boden mit sehr lockerer Oberfläche (Moos, Laub, trockene Äste) und starkem Bewuchs (Himbeere). Die frequenzabhängigen Verläufe des Schallabsorptionsgrades zeigt Abbildung 9. Es ist der typische breitbandige Verlauf für einen tief gestaffelten, porösen Absorber zu erkennen. Der detaillierte Verlauf unterscheidet sich im tieffrequenten Bereich unter 500 Hz in Abhängigkeit der Stärke des Bodenbewuchses (Mittelwert_1 nur mit Gras).



Abbildung 7: Messanordnung Bodentyp „Laubwald“



Abbildung 8: Bodenoberfläche Bodentyp „Laubwald“

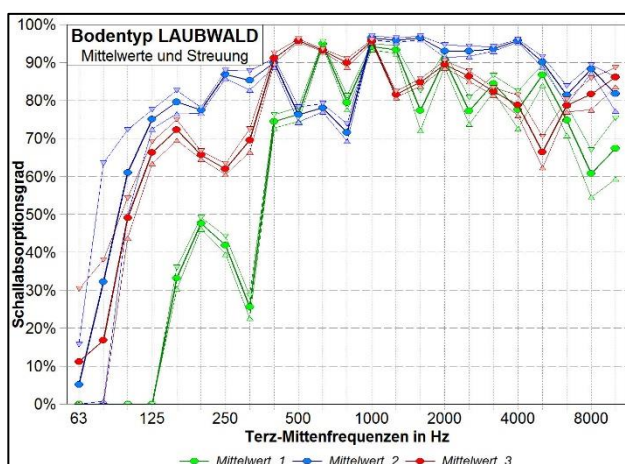


Abbildung 9: Schallabsorptionsgrade für den Bodentyp „Laubwald“

Bodentyp „Maisfeld“ (Stoppeln)

Untersucht wurden zwei Flächen des abgeernteten Maisfeldes im Bereich südlich des 30 m-Mastes. Die Messungen sind wegen des völligen Fehlens gestreuter Schallanteile gut aussagefähig. Es handelt sich um einen weitgehend trockenen Boden mit einer leichten Auflage aus trockenem Maisstroh. Die Bodenoberfläche ist nur wenig strukturiert und relativ stark verdichtet. Den frequenzabhängigen Verlauf des Schallabsorptionsgrades zeigt Abbildung 12. Er lässt die erwartungsgemäße Höhenabsorption der porösen Strohauflage erkennen, der typische Bodeneffekt bei mittleren Frequenzen fehlt hingegen. Der detaillierte Verlauf ist bei mittleren Frequenzen etwas richtungsabhängig.

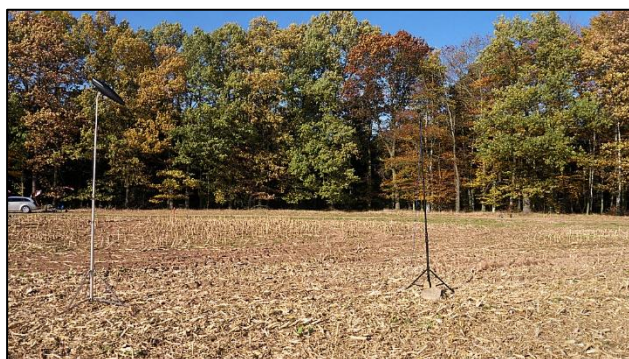


Abbildung 10: Messanordnung Bodentyp „Mais“

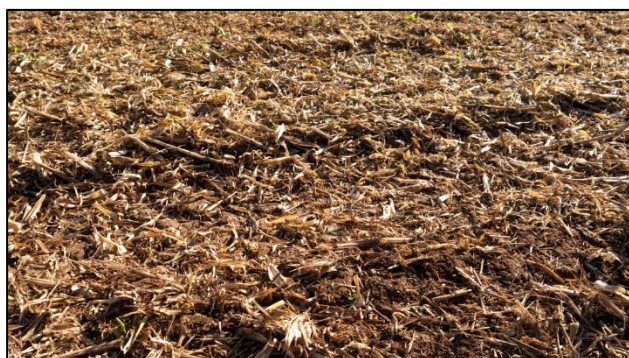


Abbildung 11: Bodenoberfläche Bodentyp „Mais“

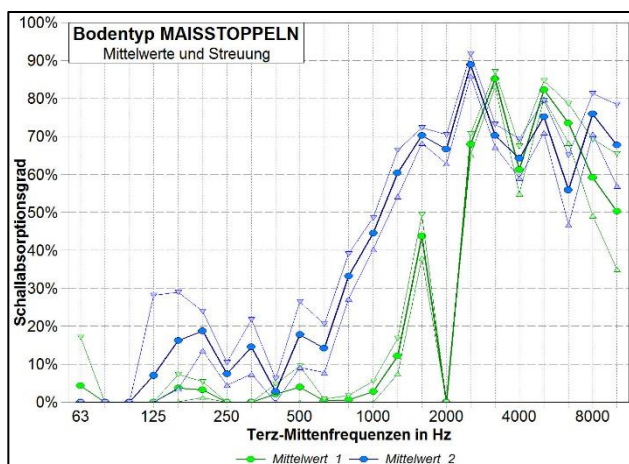


Abbildung 12: Schallabsorptionsgrade für den Bodentyp „Mais“

Bodentyp „Weg“

Südlich der Waldkante ist auf dem abgeernteten Maisfeld ein 20 bis 30 m breiter, nahezu vegetationsloser Streifen mit einer weitgehend glatten, stark verdichteten Oberfläche vorhanden, die sich stark von der eigentlichen Feldoberfläche unterscheidet. Untersucht wurden zwei Bodenflächen im Übergangsbereich zum Feld mit teilweise Gasbewuchs. Infolge des völligen Fehlens gestreuter Schallanteile sind die Messungen gut aussagefähig. Den frequenzabhängigen Verlauf des Schallabsorptionsgrades zeigt Abbildung 15. Er lässt wieder den typischen schmalbandigen Effekt poröser Böden bei mittleren Frequenzen erkennen, jedoch in einer stark richtungsabhängigen Ausprägung. Ursache dafür könnte die klare reihenförmige Anordnung der Maisstoppeln sein. Infolge des Fehlens einer ausgeprägten Bodenauflage ist nahezu keine Höhenabsorption vorhanden.



Abbildung 13: Messanordnung Bodentyp „Weg“



Abbildung 14: Bodenoberfläche Bodentyp „Weg“

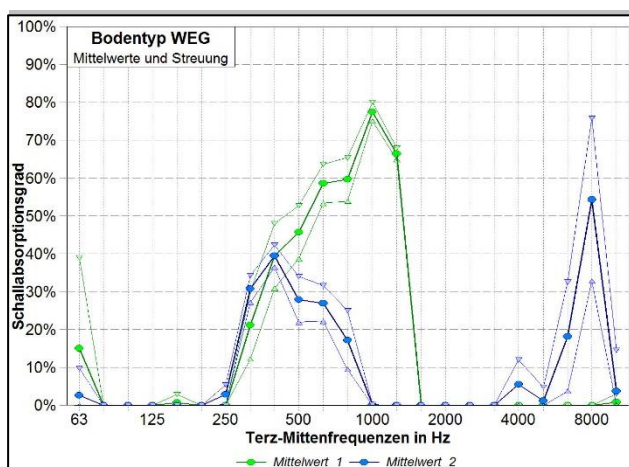


Abbildung 15: Schallabsorptionsgrade für den Bodentyp „Weg“

Bodentyp „Saat“

Nördlich der Waldkante ist ein Feld mit frischer Einsaat vorhanden, die gerade aufzugehen beginnt (Wintergetreide). Untersucht wurden zwei relativ trockene Feldflächen mit lockerer Krume und deutlichem Anwuchs. Infolge des völligen Fehlens gestreuter Schallanteile sind die Messungen gut aussagefähig. Den frequenzabhängigen Verlauf des Schallabsorptionsgrades zeigt Abbildung 18. Er lässt infolge der aufgelockerten Oberfläche einen breitbandigen Bodeneffekt bei mittleren Frequenzen mit nur geringer richtungsabhängiger Ausprägung erkennen. Infolge der klaren Reihenanordnung der Saat zeigt die Höhenabsorption hingegen eine starke Richtungsabhängigkeit.



Abbildung 16: Messanordnung Bodentyp „Saat“

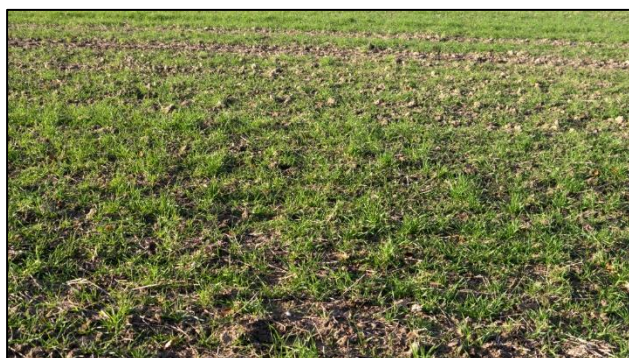


Abbildung 17: Bodenoberfläche Bodentyp „Saat“

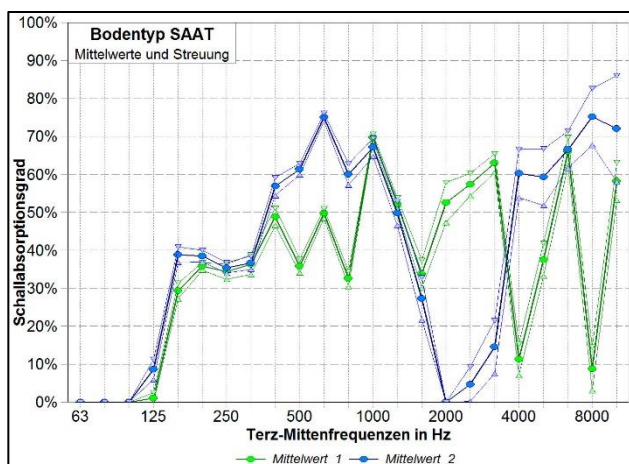


Abbildung 18: Schallabsorptionsgrade für den Bodentyp „Saat“

Bodentyp „Schlamm“

Als Pendant zum südlich an den Wald anschließenden „Weg“ ist nördlich der Waldkante ein 20 bis 30 m breiter, vollständig durchnässter Feldstreifen vorhanden („Schlamm“). Untersucht wurden zwei stark durchnässte Feldflächen ohne Anwuchs, aber einer leichten Auflage aus trockenem Laub. Infolge des völligen Fehlens gestreuter Schallanteile sind die Messungen gut aussagefähig. Den frequenzabhängigen Verlauf des Schallabsorptionsgrades zeigt Abbildung 21. Er lässt infolge der Laubauflage für beide Messrichtungen eine ausgeprägte Höhenabsorption erkennen. Bei mittleren und tiefen Frequenzen sind die Verläufe der beiden Messrichtungen jedoch sehr unterschiedlich. Ursache dafür könnte der streifenförmige Wechsel von Wasser und Bodenkrume (Saatreihen) sein, der optisch infolge der Laubauflage nicht auffällig wird.



Abbildung 19: Messanordnung Bodentyp „Schlamm“

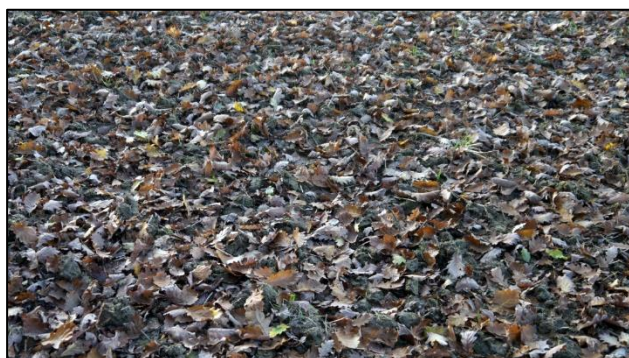


Abbildung 20: Bodenoberfläche Bodentyp „Schlamm“

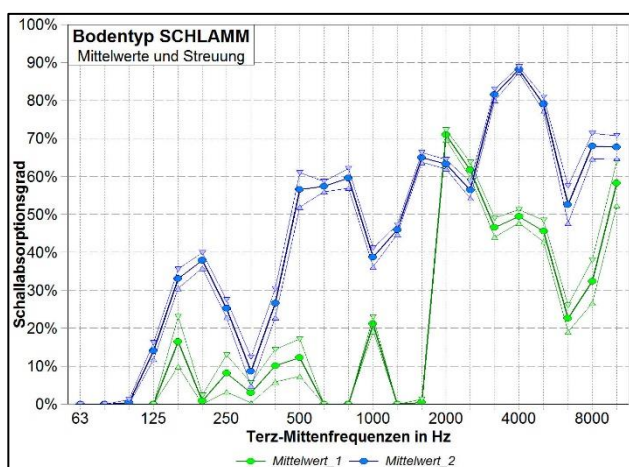


Abbildung 21: Schallabsorptionsgrade für den Bodentyp „Schlamm“

B Modellierung des Bodeneinflusses auf die Schallausbreitung

Bei der Schallausbreitung im Freien treten in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen verschiedene Einflüsse auf. Findet die Schallausbreitung in der Nähe der Erdoberfläche statt, spielt der frequenzabhängige Bodeneffekt eine maßgebliche Rolle. Am Immissionspunkt sind dann nicht nur die direkten Luftschallwellen zu berücksichtigen, sondern auch die am Erdboden reflektierten Schallwellen. Die Interferenz zwischen diesen Schallwellen kann erheblichen Einfluss auf das Schallfeld haben (Überblick: ATTENBOROUGH 1988, 2007).

Bereits PARKIN & SCHOLLES (1965) haben den frequenzabhängigen Bodeneffekt in ihren Messungen nachgewiesen und erläutert. Bestimmte Frequenzbereiche, häufig zwischen 250 Hz und 800 Hz, erfahren eine deutliche Schallpegeldämpfung im Vergleich zu größeren Frequenzen.

Der Bodeneffekt ist von geometrischen Parametern (Höhe der Schallquelle und des Mikrofons, Entfernung zwischen diesen „Punkten“), der Schallfrequenz und von akustischen Bodenparametern abhängig. Die Stärke des Bodeneffektes kann mit dem relativen Schalldruckpegel ΔL abgeschätzt werden. Dieser ergibt sich aus dem Schalldruckpegel über einer Bodenoberfläche L_p und dem Schalldruckpegel bei freier Schallausbreitung, d. h. ohne Bodeneffekt, $L_{p \text{ free}}$: $L_p = L_{p \text{ free}} + \Delta L$. Die Ableitung dieses relativen Schallpegels in Abhängigkeit von einem Kugelwellenreflexionsfaktor ist in der Übersichtsliteratur zur Schallausbreitung im Freien dargestellt (z. B. SALOMONS 2001). Entsprechend dieser Vorgehensweise wurde der Bodeneffekt für verschiedene Parameterkombinationen und in Anlehnung an die Geometrie der Messungen analytisch berechnet. Zu berücksichtigen ist, dass der Bodeneffekt ohne die Einbeziehung meteorologischer Effekte abgeschätzt wurde.

Die Höhe des Senders wurde mit 1 m über Grund und die der Empfänger mit 2,4 m über Grund senderseitig bzw. 4 m nach Walddurchgang angenommen. Für die Entfernungen zwischen Sender- und Empfangspunkt wurden Mittelwerte aus den Messungen 2014 und 2015 für die Laubwald- und die Nadelwaldmessstrecke angenommen: 11,0; 19,1; 26,3; 34,1; 41,7 m auf der Senderseite vor Schalldurchgang durch den Wald und 261,0; 326,6; 393,4; 461,9; 527,9 m empfängerseitig nach Walddurchgang.

Die Modellsimulationen wurden für verschiedene Terzbänder durchgeführt. Um diese Frequenzbänder adäquat abzubilden, wurde ein äquidistanter Frequenzabstand von 1 Hz gewählt (SALOMONS 2001). Die Quellstärke der Schallquelle ist konstant für alle Frequenzen. Dieser Ansatz ist bei der Ergebnisübertragung auf Schallquellen mit abweichenden Frequenzspektren zu berücksichtigen.

Die Bodenimpedanz wird üblicherweise mit unterschiedlichen Werten des akustischen Strömungswiderstandes simuliert (DELANY & BAZLEY 1970). Die in dieser Studie verwendeten Werte sind typisch für einen unbewachsenen verfestigten Boden (1.000 kPa s/m²) bzw. einen Waldboden (50 kPa s/m²). Zu beachten ist jedoch die Schwankungsbreite dieser Parameterwerte für verschiedene Standorte (ATTENBOROUGH et al. 2011). Der Waldboden wirkt häufig schalldämpfender als der unbewachsene Boden. In der Abbildung 22 sind beispielhafte Ergebnisse für die minimalen und maximalen Entfernungen (sender- und empfängerseitig) dargestellt.

Der relative Schalldruckpegel kann positive (negative Schalldämpfung = erhöhter Schallpegel) und negative (positive Schalldämpfung = verringerter Schallpegel) Werte annehmen. Bereits für Schallfrequenzen größer als ca. 63 Hz wirkt der Waldboden bei einer Schallausbreitung über mehrere 100 m dämpfend, d. h. an einem Empfänger werden geringere Schallpegelwerte bestimmt als ohne Bodeneffekt. Mit abnehmender Entfernung (11–42 m) verschiebt sich dieser sogenannte „ground dip“ zu höheren Frequenzen um 200–300 Hz und schwächt sich ab (Dämpfung: 7–10 dB). Für einen verfestigten Boden ergibt sich auch ein Maximum der Dämpfung, das jedoch zu höheren Frequenzen verschoben ist und besonders für größere Entfernungen einen geringeren Frequenzbereich umfasst.

Für die senderseitigen Entfernungen resultieren weitere Nebenmaxima der Bodendämpfung im betrachteten Frequenzbereich. Bei den empfängerseitigen (größeren) Entfernungen kommt nur ein „ground dip“ vor, der allerdings sehr deutlich ausgeprägt ist. Bei der Bewertung von Dämpfungen zwischen zwei Empfängerpunkten sind diese unterschiedlichen Bodeneffekte zu involvieren.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Empfängerpunkte entlang der Laubwaldstrecke eine größere Entfernung vom Sender im Vergleich zur Nadelwaldstrecke aufwiesen: mindestens 16 m für den Empfänger direkt an der Waldkante und maximal 42 m für das entfernteste Mikrofon. Auch zwischen den beiden Messkampagnen (Modul 1 und 2) gab es leichte Abweichungen.

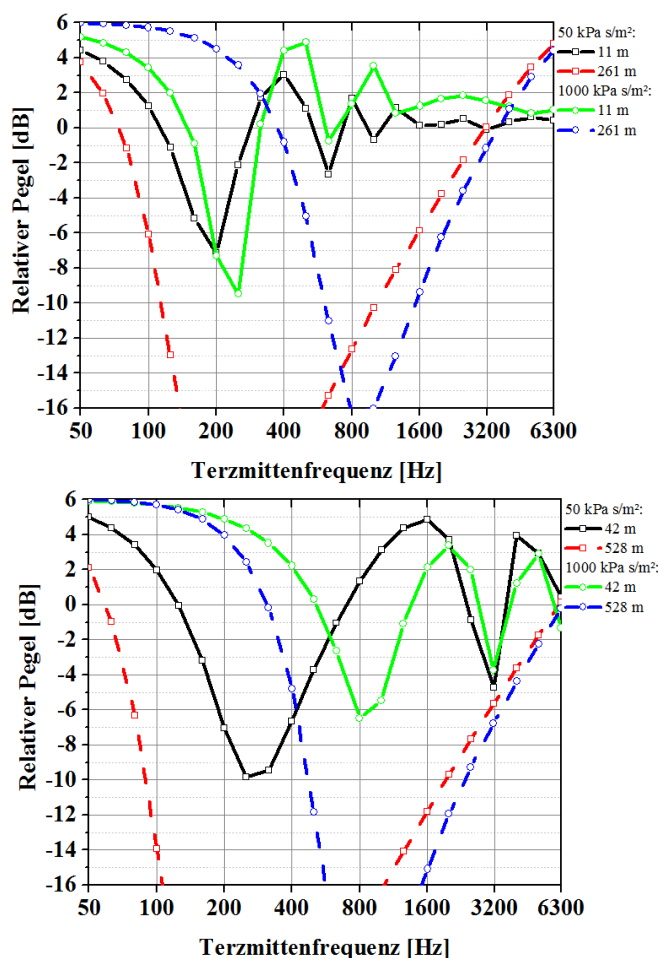


Abbildung 22: Relativer Schallpegel zur Bestimmung des akustischen Bodeneinflusses

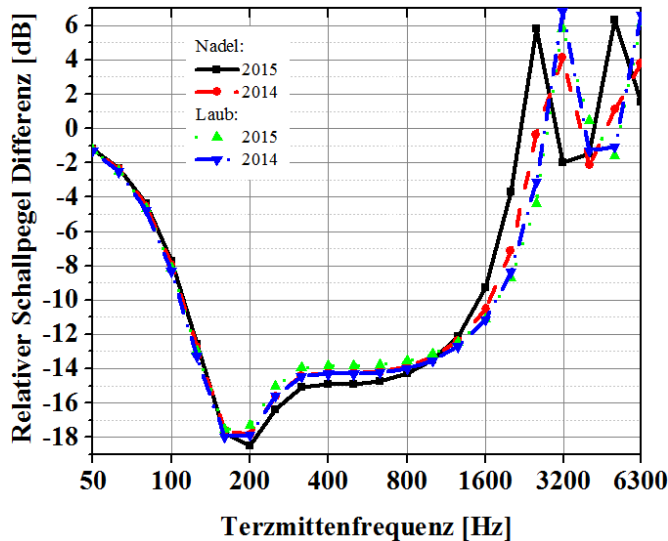


Abbildung 23: Dämpfung durch den Bodeneffekt im Waldgebiet und Abhängigkeit von der Entfernung

Die Auswirkung der unterschiedlichen Entfernungen auf den Bodeneffekt im Waldgebiet wird in der Abbildung 23 untersucht. Hier ist die Differenz der Bodendämpfung ΔL zwischen den Empfängerpunkten nach und vor Walddurchgang dargestellt. Für die gesamte Ausbreitungsstrecke wurde mit einem waldbodentypischen Wert für den akustischen Strömungswiderstand gerechnet (50 kPa s/m^2). Die variierenden Abstände für die Nadel- und Laubwaldstrecke bzw. zwischen den Messkampagnen sind erst bei höheren Frequenzen $> 1.600 \text{ Hz}$ signifikant. Für den unteren und mittleren Frequenzbereich liegen die Unterschiede bei 1 dB . In diesem Frequenzbereich ist der Bodeneinfluss bei Walddurchgang mit einer Dämpfung verbunden (negative Werte der Differenz der relativen Schallpegel), d. h. der Schallpegel verringert sich. Maximale Bodeneffekte sind um 200 Hz zu erwarten. Die dämpfende Wirkung von Waldböden besonders bei geringen Frequenzen wurde auch von anderen Autoren bestätigt (z. B. EMBLETON et al. 1976; ATTENBOROUGH et al. 2011). Bei höheren Frequenzen nimmt der direkte Einfluss der Vegetationselemente (Streuung und Absorption) auf die Schallausbreitung zu (z. B. FRICKE 1984; SWEARINGEN & WHITE 2007).

Ein direkter Ab- und Vergleich der Modellergebnisse mit den Messungen ist nicht möglich, weil bei den Messungen (Abbildung 4 bis Abbildung 21) der Schallabsorptionsgrad (ergibt sich aus dem quadrierten Schallreflexionsgrad) und nicht der Schallreflexionsfaktor ausgewertet wurde. Eine Rückrechnung auf den Schallreflexionsfaktor mit Imaginär- und Realteil ist nicht möglich. Der frequenzabhängige Reflexionsfaktor geht in die Bestimmung der Bodenimpedanz ein, die wiederum für die Berechnung des Bodeneffektes (Abbildung 22) benötigt wird.

Trotz dieser Datenunterschiede ergeben sich qualitative Übereinstimmungen zwischen dem modellierten und gemessenen Bodeneffekt, z. B. in der Frequenz-Lage des „ground dip“ (Schalldämpfung) zwischen 200 und 400 Hz für den Waldboden im Vergleich zu deutlich höheren Frequenzen der maximalen Schalldämpfung bei einem verdichteten, unbewachsenen Boden.

C Auswertung von meteorologischen Messungen an Einzeltagen

Die Methodik der Auswertung der meteorologischen Messungen wird im Hauptdokument, Kapitel 5.2, beschrieben.

Modul 1

In den folgenden Abbildungen sind exemplarische Ergebnisse der meteorologischen Profilmessungen für den 19.10.2014 dargestellt. Dieser trockene Strahlungstag war durch eine antizyklonale Südlage mit ausgeprägtem Tagesgang der Schalltemperatur charakterisiert (Abbildung 24). Bis in den späten Vormittag herrschte vorwiegend Südwind, der in den Mittagsstunden unter Auffrischung auf Südwest drehte. An diesem Tag wurden Maxima der über 30 min gemittelten Schalltemperatur von knapp 22 °C am Clarkmast auf der Südseite des Waldgebietes erreicht. Der 3-m-Mast und seine Umgebung wurden nahezu den gesamten Tag lang durch den Wald beschattet. Daraus resultiert das niedrigere Temperaturniveau auf der Nordseite des Waldgebietes. Für diesen Standort ist außerdem eine bodennahe Temperaturinversion über den dargestellten Messzeitraum festzustellen. Im Vergleich dazu kehrt sich das Profil der Schalltemperatur am Clarkmast in den Morgenstunden um: von einer Temperaturzunahme mit der Höhe in eine Temperaturabnahme. In den späten Nachmittagsstunden erfolgt die Rückkehr des Profils in eine Temperaturinversion.

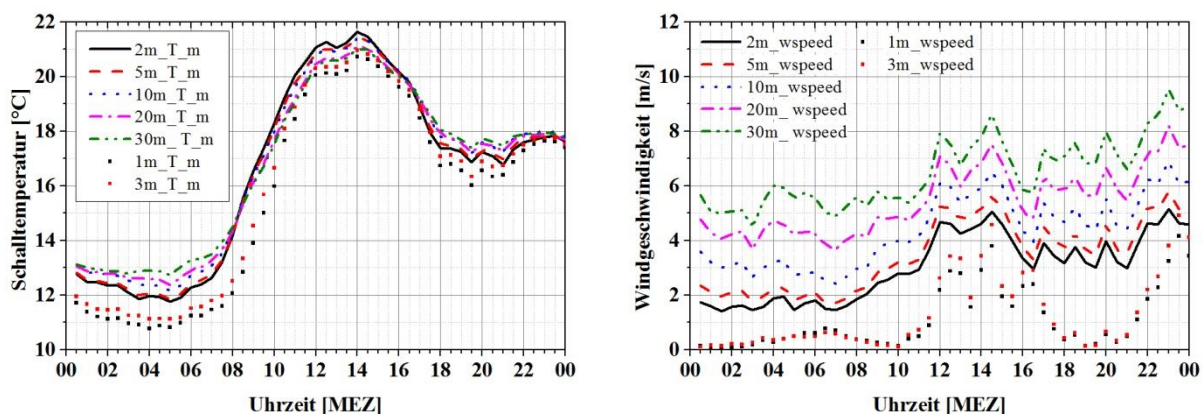


Abbildung 24: Tagesgang der mittleren Schalltemperatur und horizontalen Windgeschwindigkeit am 19.10.2014 in verschiedenen Höhen

Der Einfluss des Waldgebietes ist auch in den Windmessungen ersichtlich (Abbildung 24). Im Lee ist die Windgeschwindigkeit deutlich geringer. Luvseitig fällt die relativ starke Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe auf, ein typischer Waldkanteneffekt. Die Auswirkungen des Maisfeldes sind vor allem in 2 m und 5 m Höhe ersichtlich.

Exemplarische Vertikalgradienten der Schallgeschwindigkeit und der Windgeschwindigkeit am 30-m-Clarkmast (Bezugshöhe: 2 m) und am 3-m-Mast (Bezugshöhe: 1 m) verdeutlichen den Einfluss des Waldgebietes auf die akustisch relevanten meteorologischen Größen (Abbildung 25). Günstige meteorologische Randbedingungen für eine weitreichende Schallausbreitung treten auf der Senderseite vor allem nachts auf. Empfängerseitig sind diese Bedingungen ganztägig vorzufinden. Die Gradienten sind hier, wie bereits weiter oben beschrieben, größer als am Clarkmast.

Um die Schallausbreitungssituation einzuschätzen, sind allerdings gleichermaßen die vertikalen Windgradienten zu untersuchen (Abbildung 25). Diese sind am Clarkmast gantztägig positiv. Am 3-m-Mast wechselt das Vorzeichen. Hierbei sind die generell geringen Windgeschwindigkeiten vor allem in den Morgen- und Vormittagsstunden sowie am frühen Abend zu berücksichtigen.

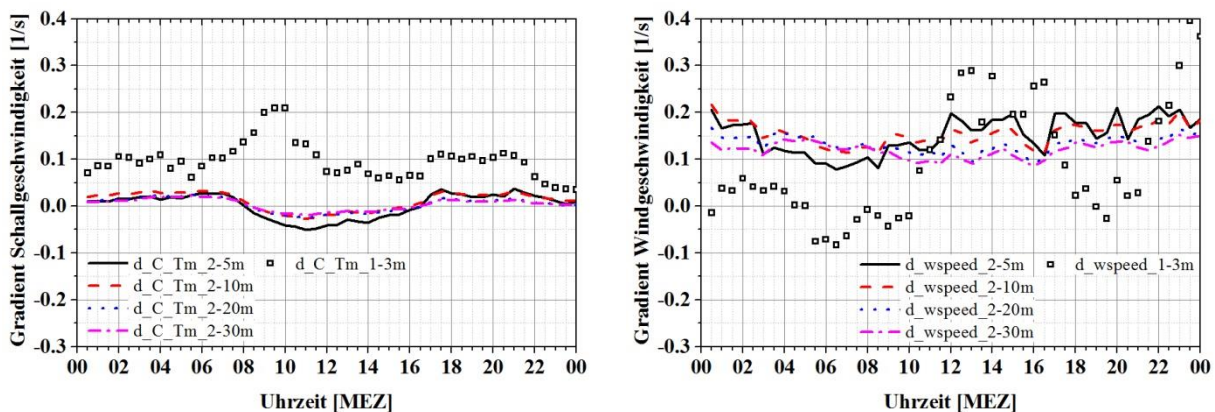


Abbildung 25: Tagesgang der vertikalen Gradienten der mittleren Schallgeschwindigkeit und horizontalen Windgeschwindigkeit am 19.10.2014 in verschiedenen Höhen

Zusätzlich zur Windgeschwindigkeit beeinflusst die Windrichtung die meteorologisch bedingte Schallbrechung. Dieser Effekt wird mit der effektiven Schallgeschwindigkeit (Summe aus temperaturbeeinflusster Schallgeschwindigkeit und Windkomponente in Schallausbreitungsrichtung) und ihrem Vertikalgradienten zwischen verschiedenen Höhen beschrieben (siehe Hauptdokument, Kapitel 5.3).

Modul 2

In den folgenden Abbildungen sind exemplarische Ergebnisse der meteorologischen Profilmessungen für den 19.03.2015 dargestellt. Dieser trockene Strahlungstag war, wie auch der 19.10.2014, durch einen ausgeprägten Tagesgang der Schalltemperatur charakterisiert. In der Nacht wurden im Lee des Waldgebietes die geringsten Temperaturwerte gemessen (3-m-Mast). Tagsüber setzte hier, bei auf nördliche Richtungen drehendem Wind, eine deutliche Erwärmung in Bodennähe ein, die auch zu negativen Schallgeschwindigkeitsgradienten führte (Abbildung 27).

Die Windgeschwindigkeit war vergleichsweise gering, insbesondere in den Morgenstunden. Die größten Windgradienten wurden in der Mittagszeit am 3-m-Mast gemessen. In dieser Zeit befand sich der kleine Mast im Luv des Waldes.

Im Vergleich mit dem 19.10.2014 wiesen alle Gradienten einen stärkeren Tagesgang auf. Insbesondere der Schallgeschwindigkeitsgradient erreichte deutlich größere Werte am 19.03.2015.

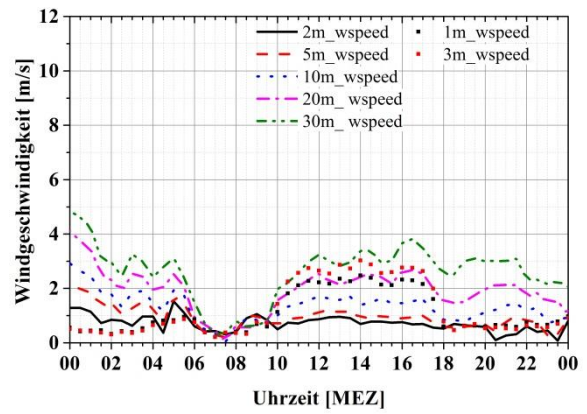
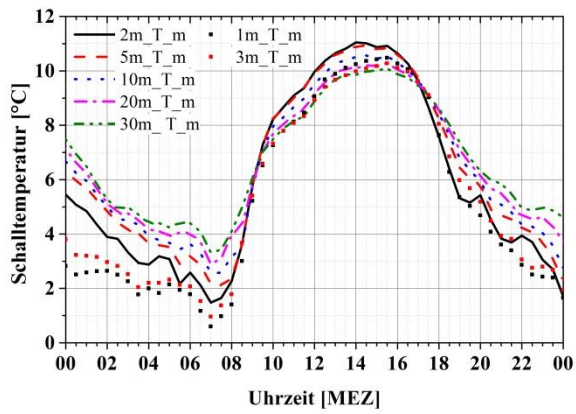


Abbildung 26: Tagesgang der mittleren Schalltemperatur und horizontalen Windgeschwindigkeit am 19.03.2015 in verschiedenen Höhen

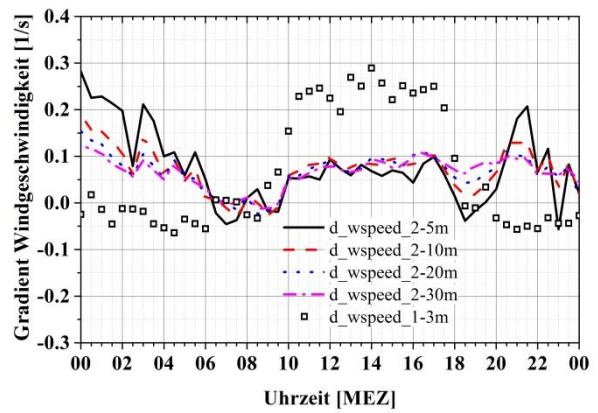
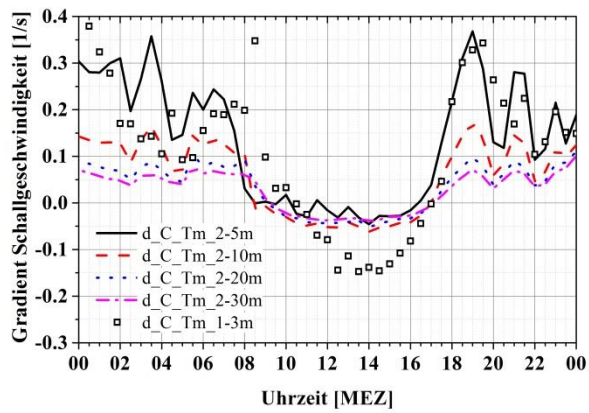


Abbildung 27: Tagesgang der vertikalen Gradienten der mittleren Schallgeschwindigkeit und horizontalen Windgeschwindigkeit am 19.03.2015 in verschiedenen Höhen

D Zusammenhang der tageszeitlichen Schwankungen von akustischen und meteorologischen Größen

In den folgenden Abbildungen werden die Tagesgänge der effektiven Schallgeschwindigkeit, die vertikalen Gradienten dieser Größe für zwei Höhenschichten sowie die Walddämpfung an den akustischen Messtagen dargestellt.

Abbildung 28 bis Abbildung 34 zeigen die Ergebnisse für Modul 1 und Abbildung 35 bis Abbildung 44 für Modul 2.

Die effektive Schallgeschwindigkeit (temperatur- und feuchteabhängige Schallgeschwindigkeit und Windgeschwindigkeitskomponente in Schallausbreitungsrichtung) wurde aus den 10-Hz-Messungen als Mittelwert über 30 min ausgewertet. Die Standardabweichungen kennzeichnen die zeitliche Variabilität dieser Größe. Die vertikalen Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit sind für jeweils einen Höhenbereich am 30-m-Clarkmast und am 3-m-Mast abgebildet. Diese Höhenbereiche haben einen wichtigen Einfluss auf die Schallausbreitung vom Sender (Clarkmast) zum Empfänger (3-m-Mast).

Die Walddämpfung ergibt sich aus den Dämpfungen zwischen den Mikrofonen auf der senderseitigen bzw. empfängerseitigen Waldkante. Dunkelgrüne Messpunkte geben Messungen durch das Nadelwaldgebiet an, hellgrüne stehen für Laubwaldmessungen.

Die zeitliche Variabilität der Walddämpfung ist mit derjenigen der effektiven Schallgeschwindigkeit gekoppelt. So treten am 30.10.2014 relativ konstante Gradienten während der akustischen Messungen auf – die Walddämpfung ist ebenfalls nahezu konstant. Eine größere Streuung der meteorologischen Werte am 17.03.2015 spiegelt sich auch in den Dämpfungsmessungen wider. Am 24.03.2015 ist erwartungsgemäß die Verringerung der Gradienten (Umschlag von positiv zu negativ, d. h. von einer ausbreitungsbegünstigten zu einer ungünstigen Situation) mit einer Zunahme der Dämpfung verbunden. Am 23.03.2015 ist der umgekehrte Fall zu beobachten. Die Ursache für die Zunahme der Dämpfung mit zunehmenden Gradienten (verbunden mit zunehmender Standardabweichung) am 24.10.2014 wird noch weiter untersucht.

Generell gilt: Der Zusammenhang zwischen den Tagesgängen ist hoch, wenn die Standardabweichung der Gradienten relativ gering ist. Für diese Fälle ergibt sich mit einem positiven/zunehmenden Gradienten eine abnehmende Dämpfung und umgekehrt. An vielen Tagen wurde häufig während Zeiten gemessen, in denen die Schallgeschwindigkeitsgradienten relativ konstant waren.

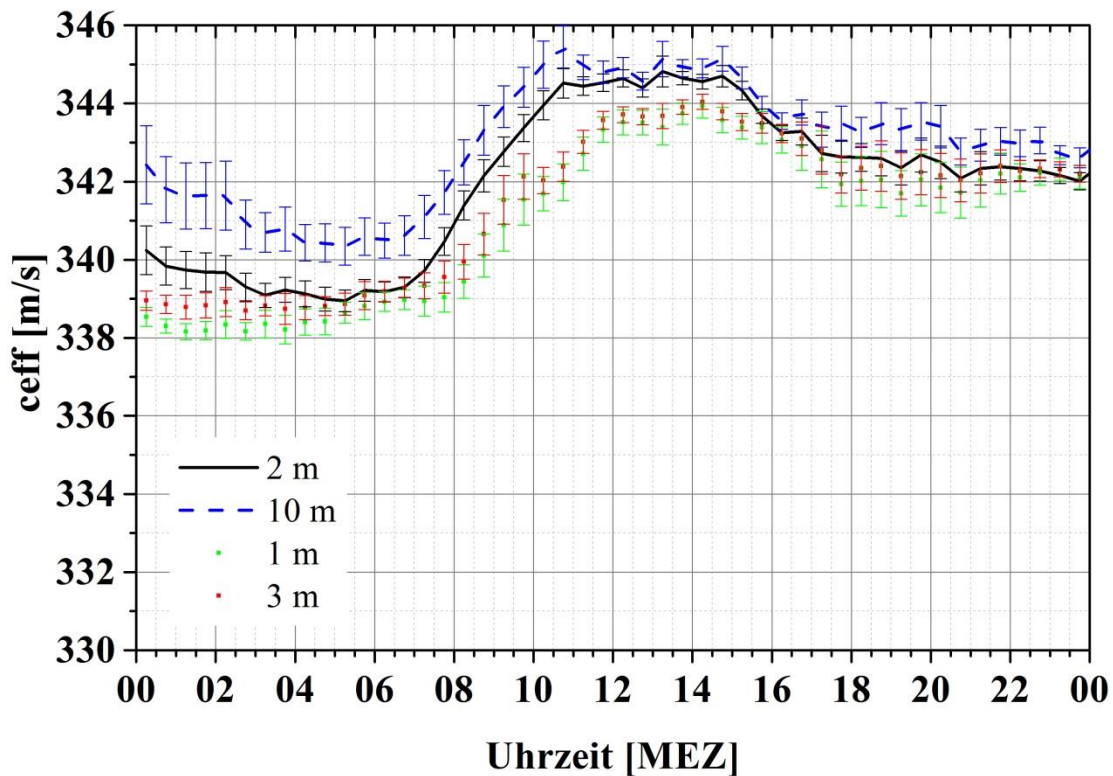
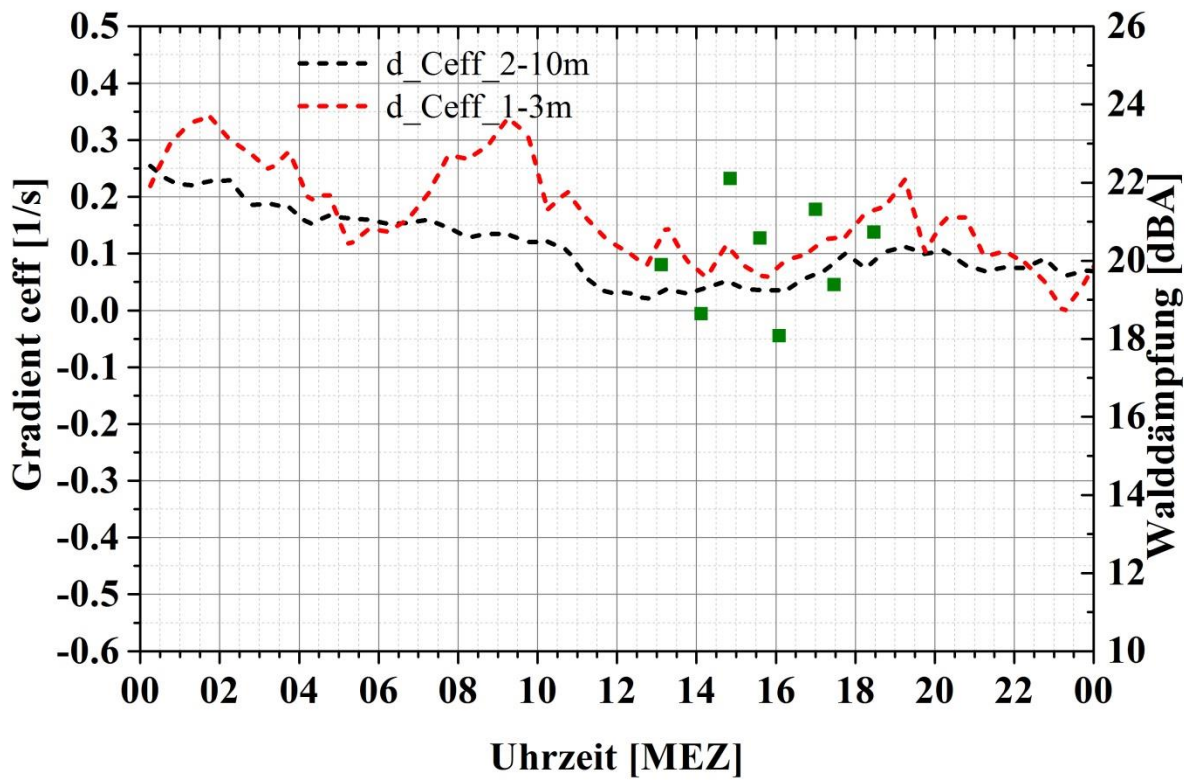


Abbildung 28: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 19.10.2014

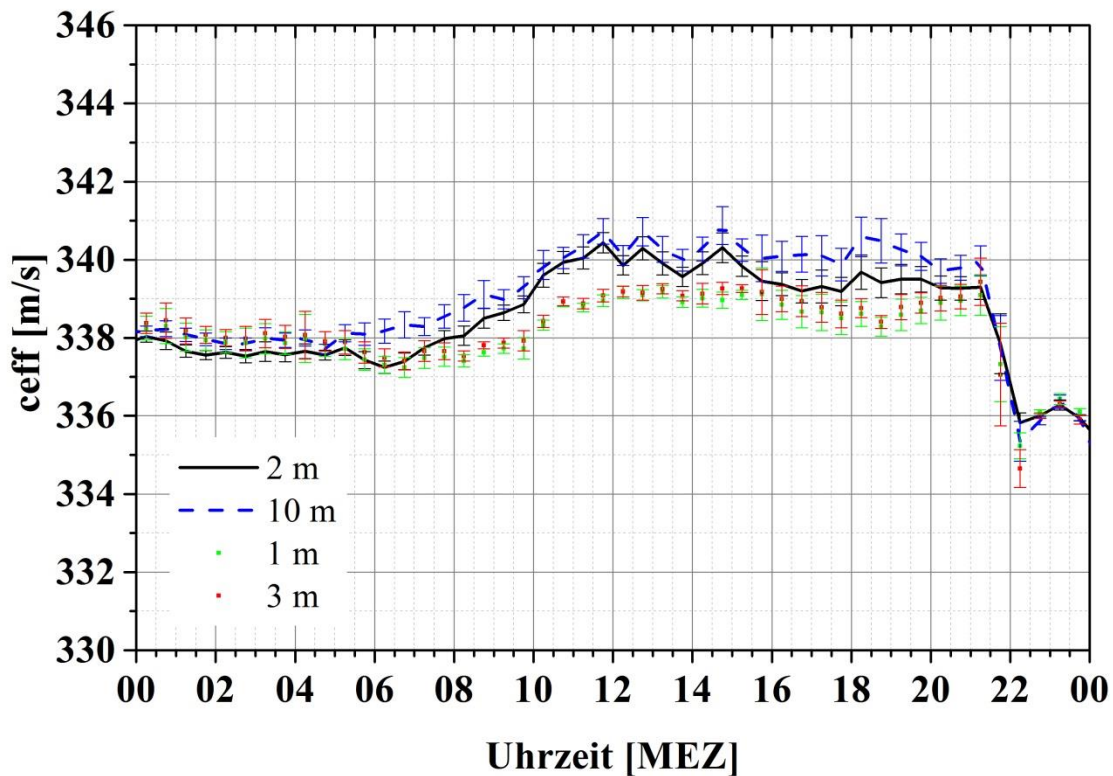
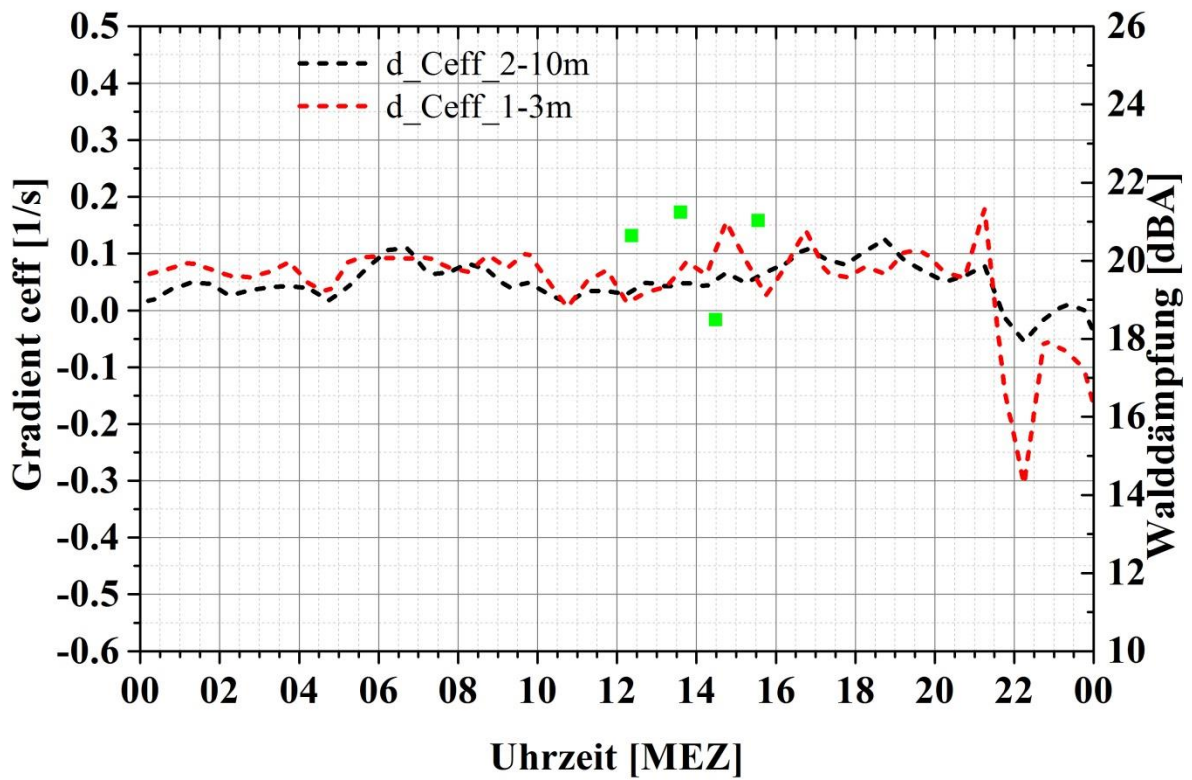


Abbildung 29: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 21.10.2014

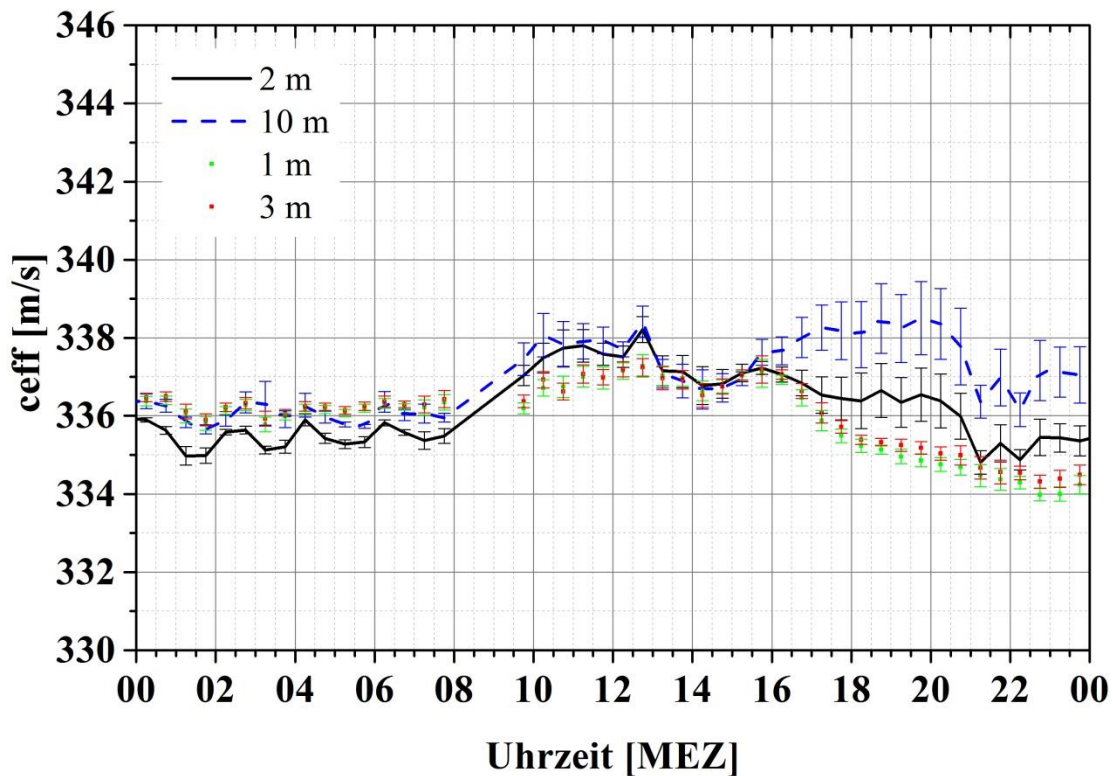
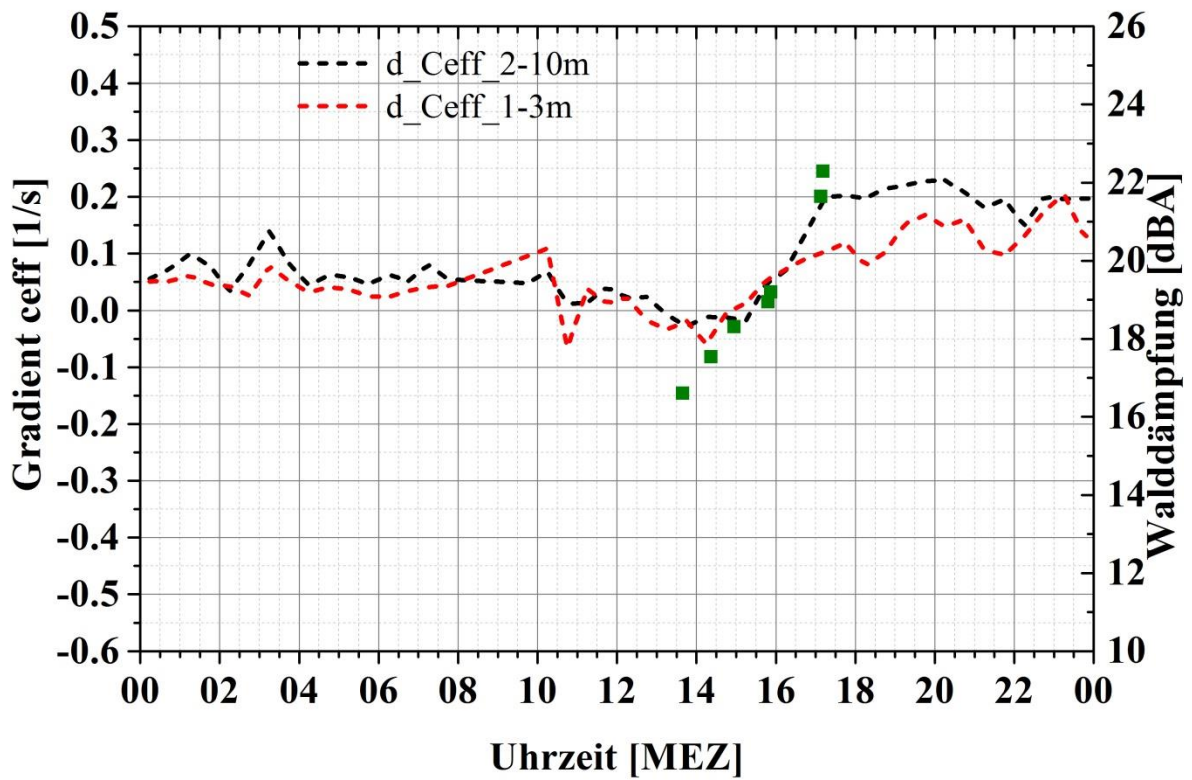


Abbildung 30: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 24.10.2014

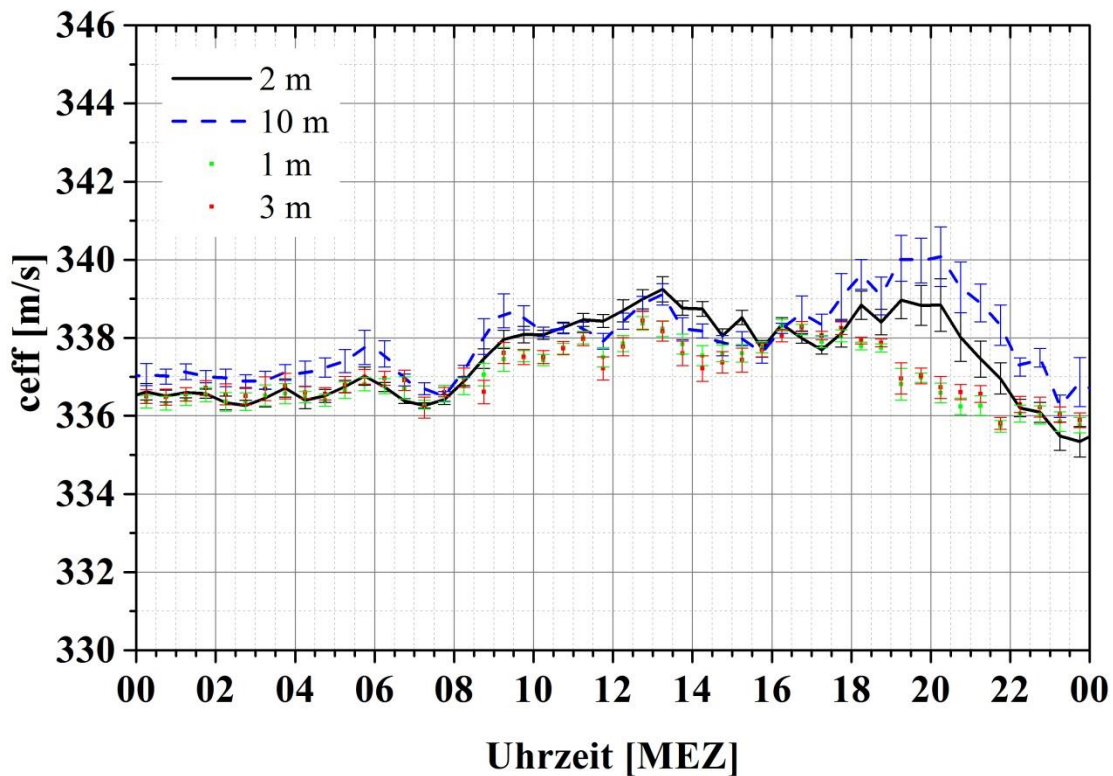
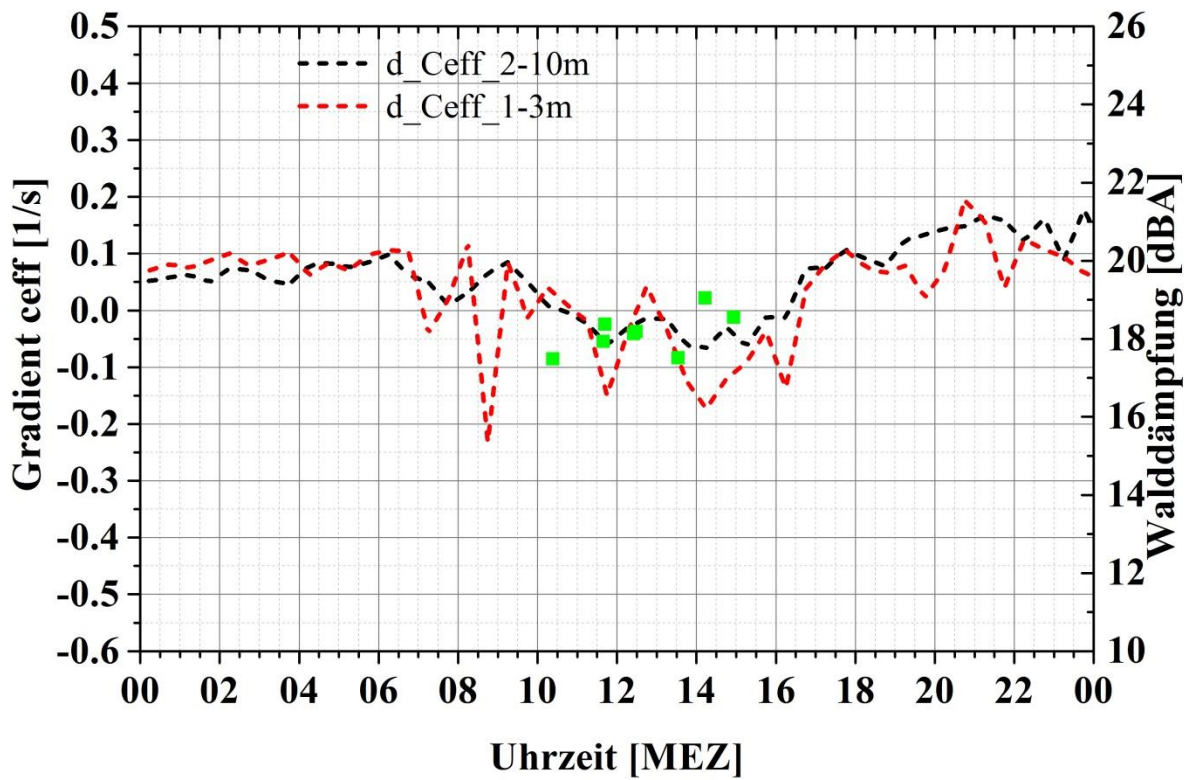


Abbildung 31: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 26.10.2014

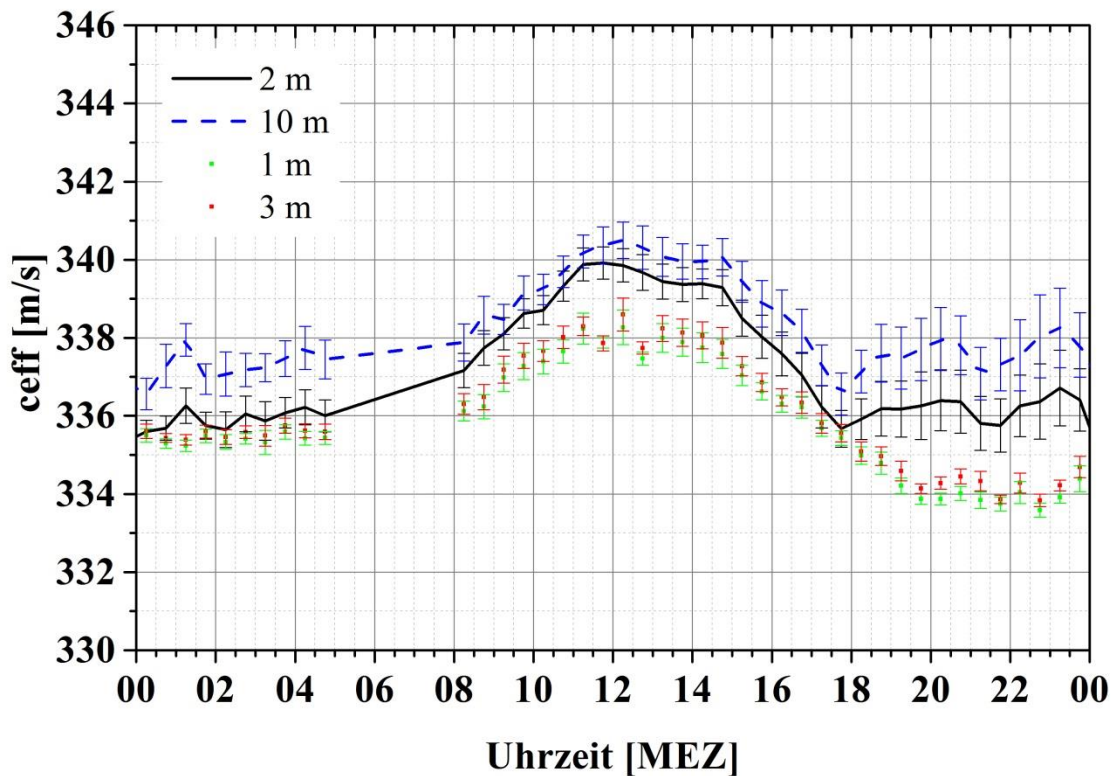
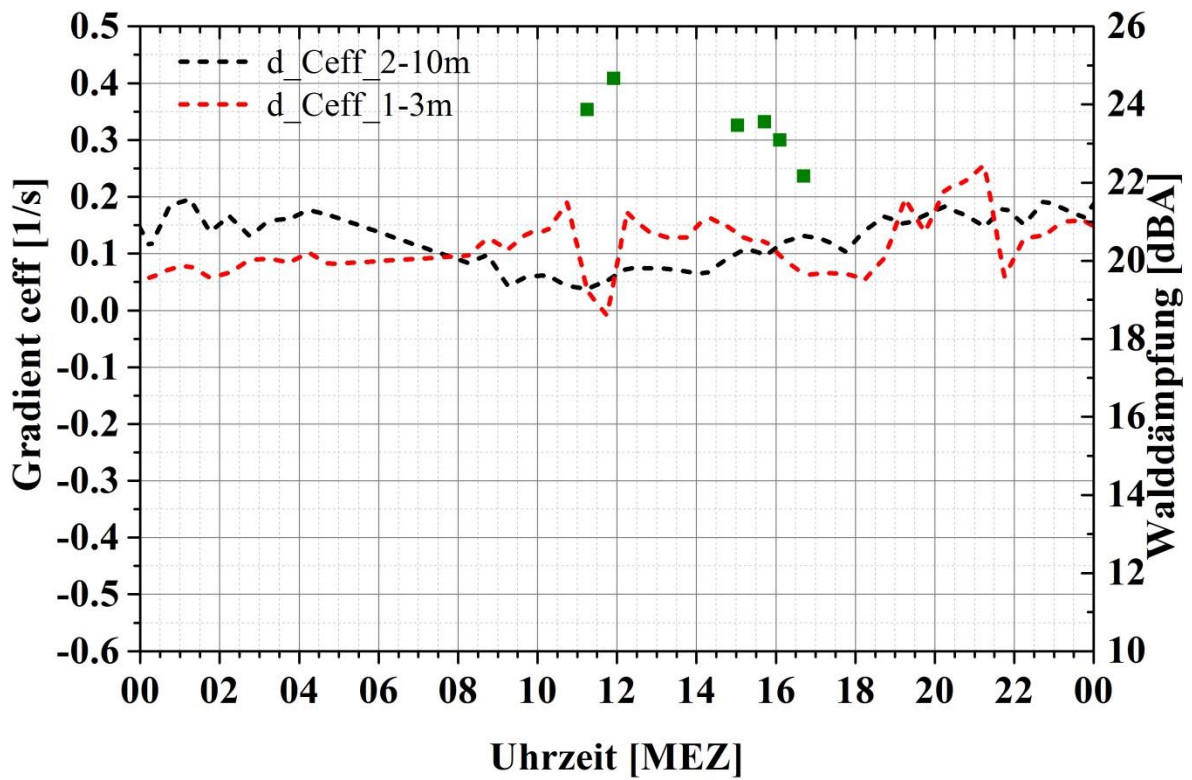


Abbildung 32: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit $ceff$ (unten), der vertikalen Gradienten von $ceff$ und der Walddämpfung (oben) am 27.10.2014

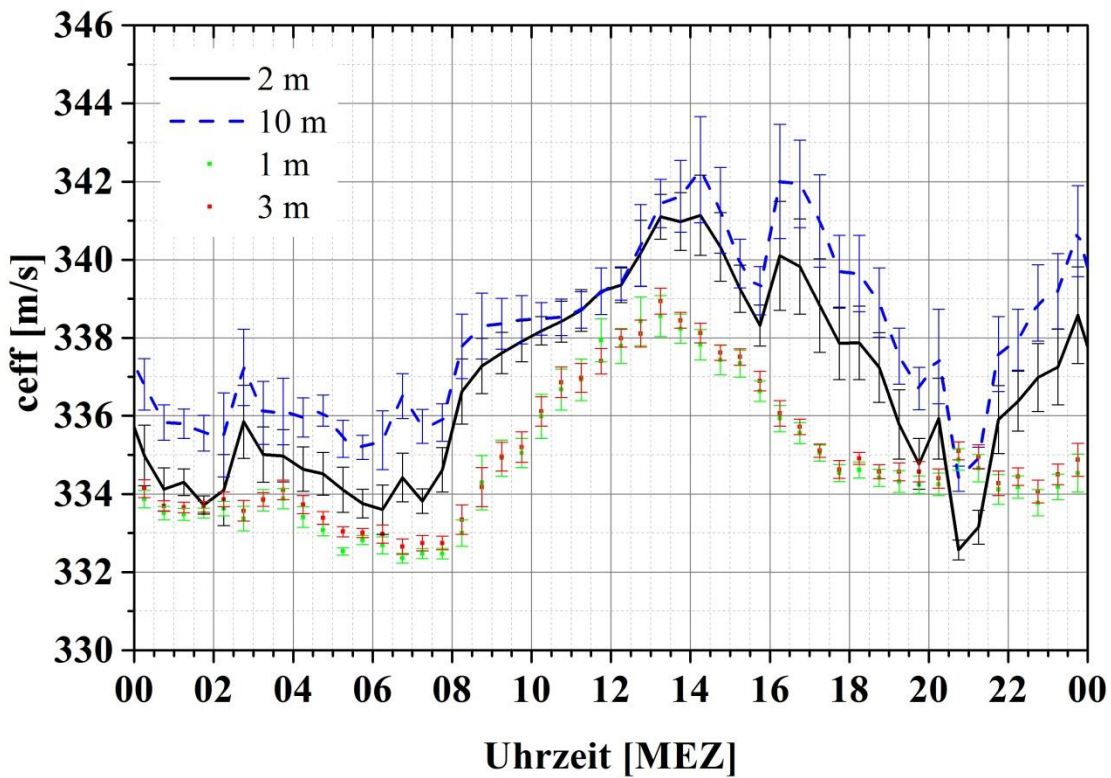
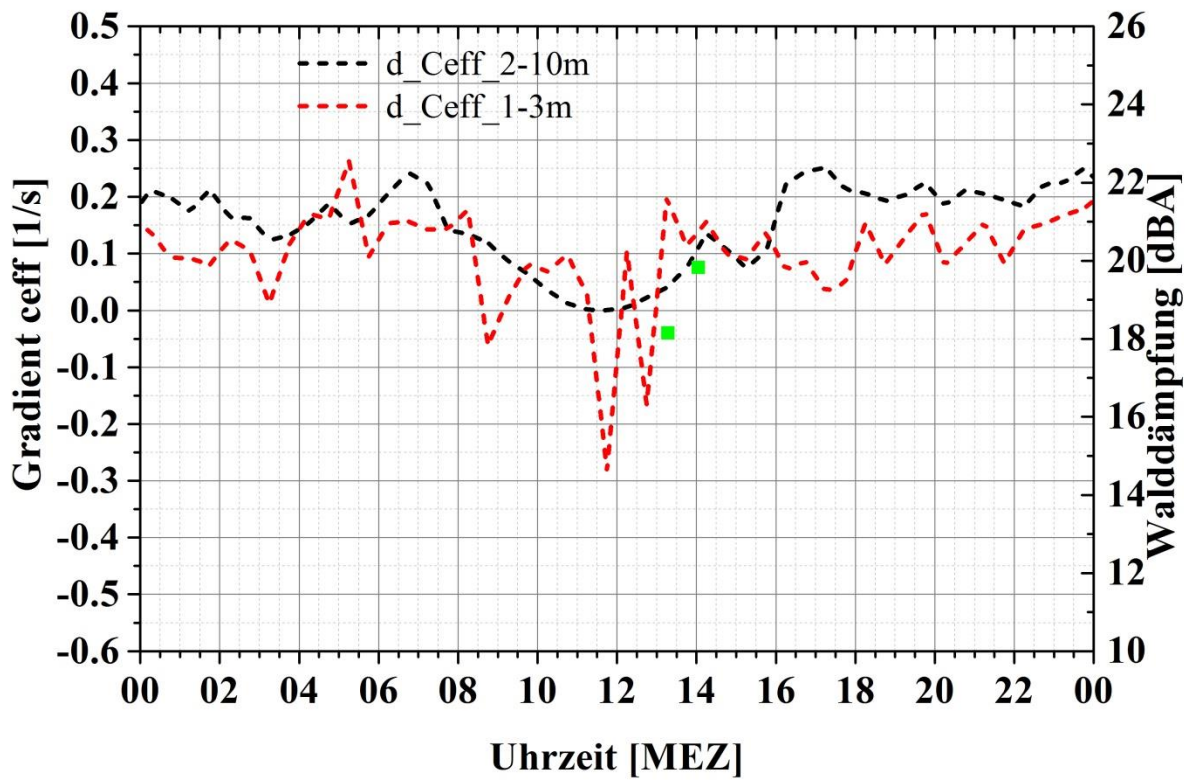


Abbildung 33: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 28.10.2014

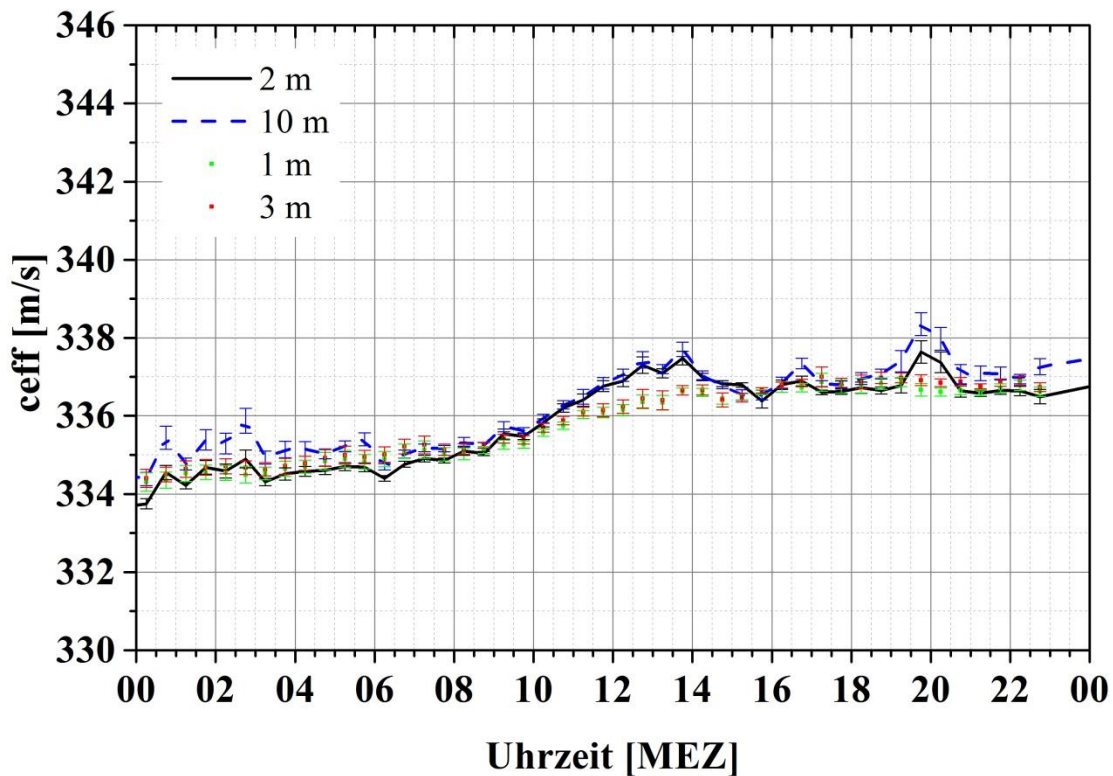
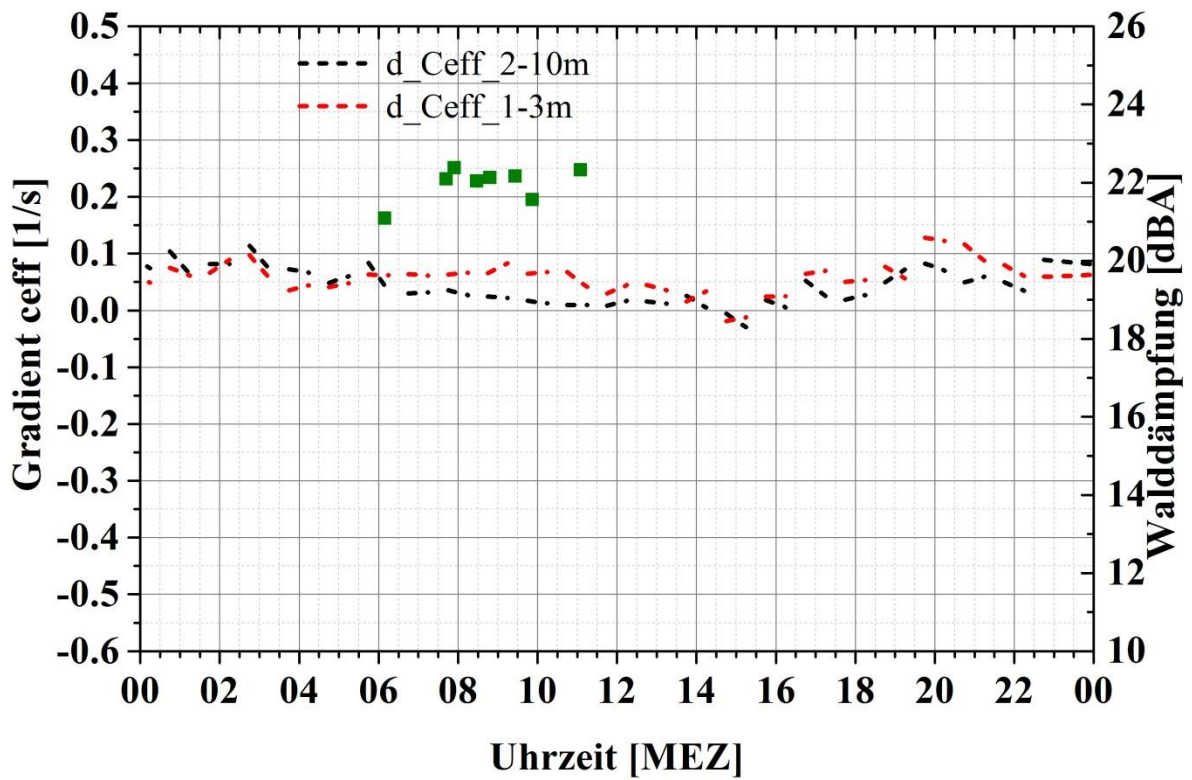


Abbildung 34: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit $ceff$ (unten), der vertikalen Gradienten von $ceff$ und der Walddämpfung (oben) am 30.10.2014

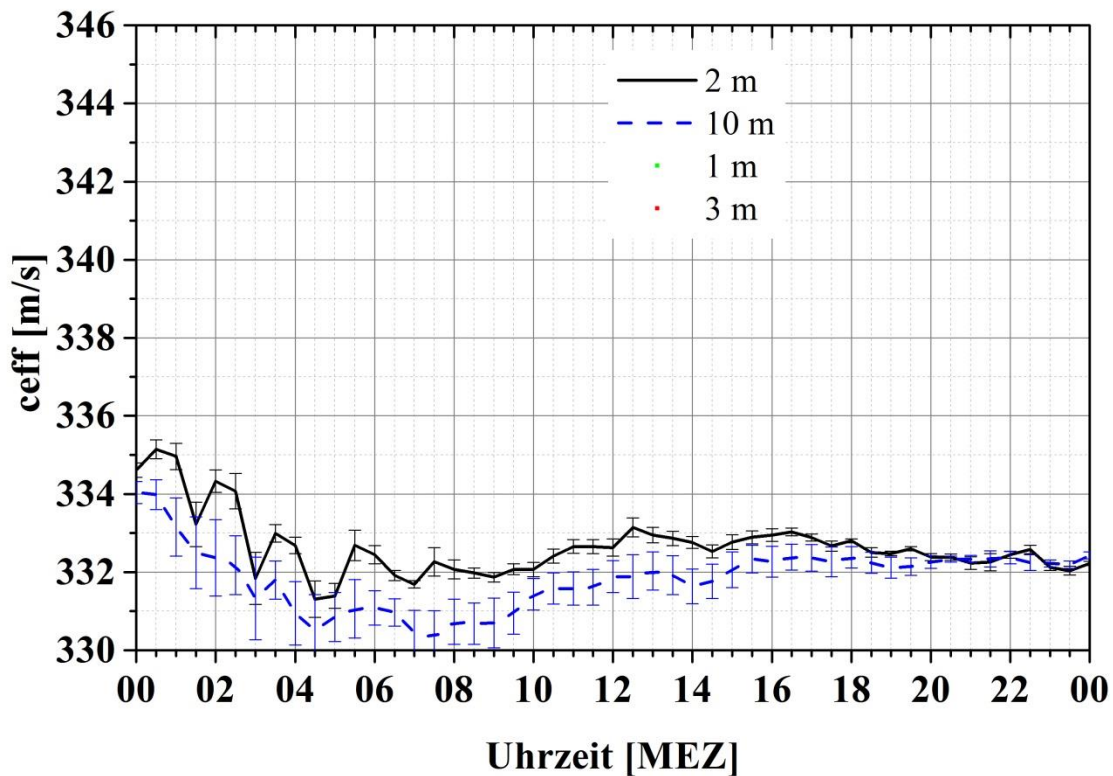
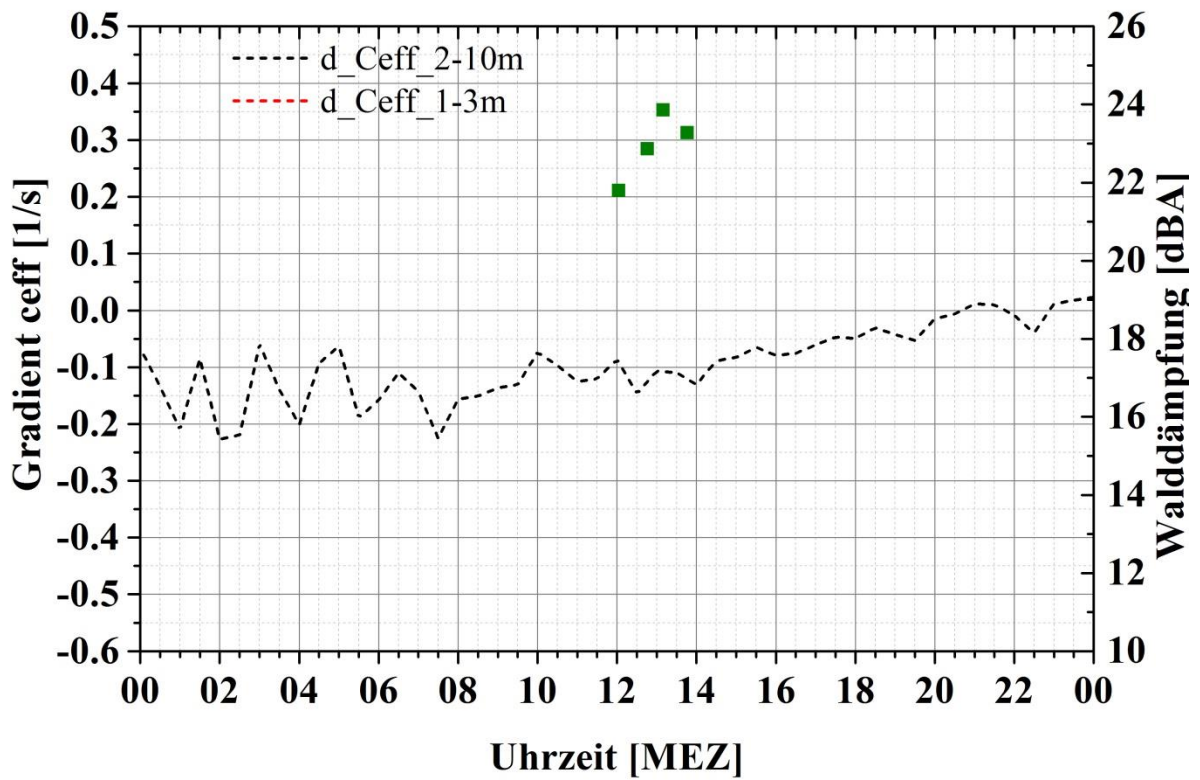


Abbildung 35: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 11.03.2015

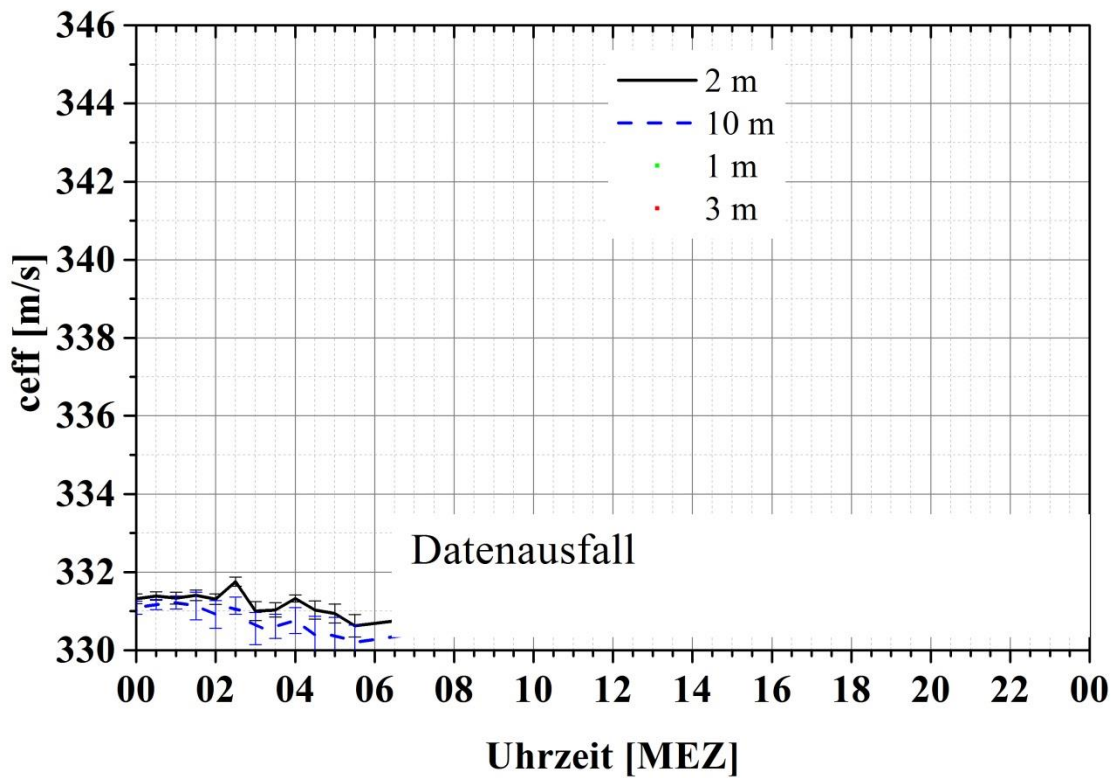
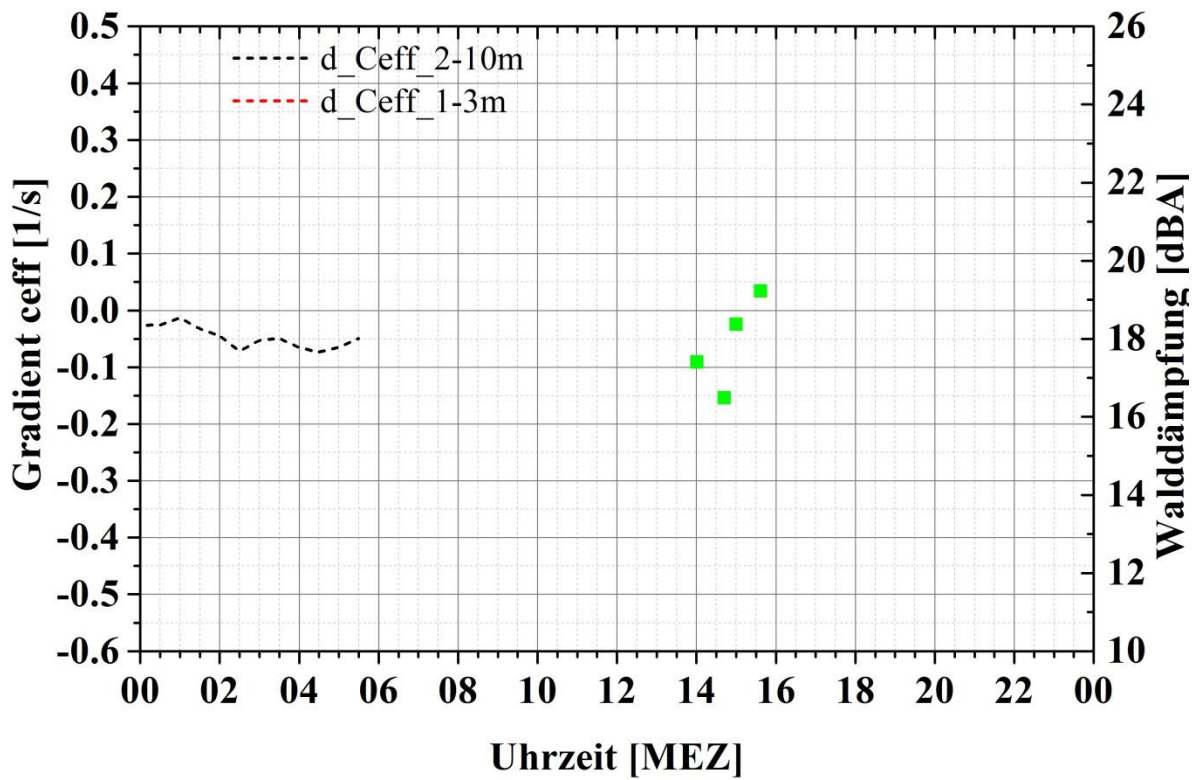


Abbildung 36: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 13.03.2015

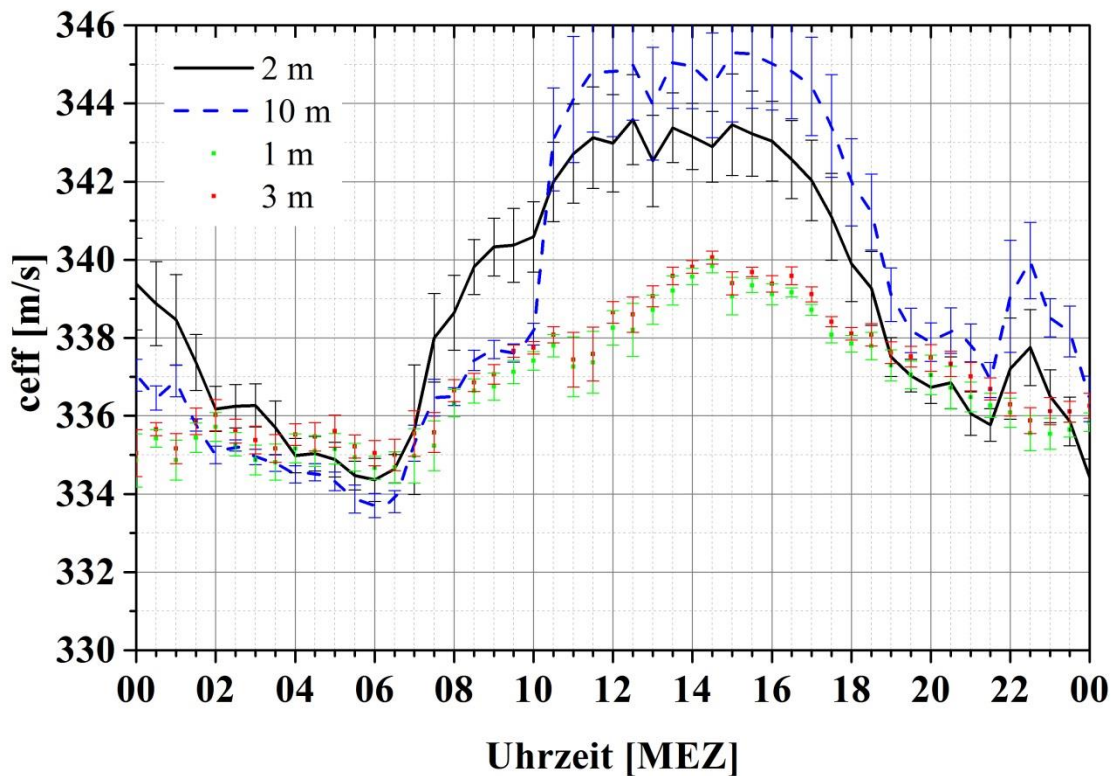
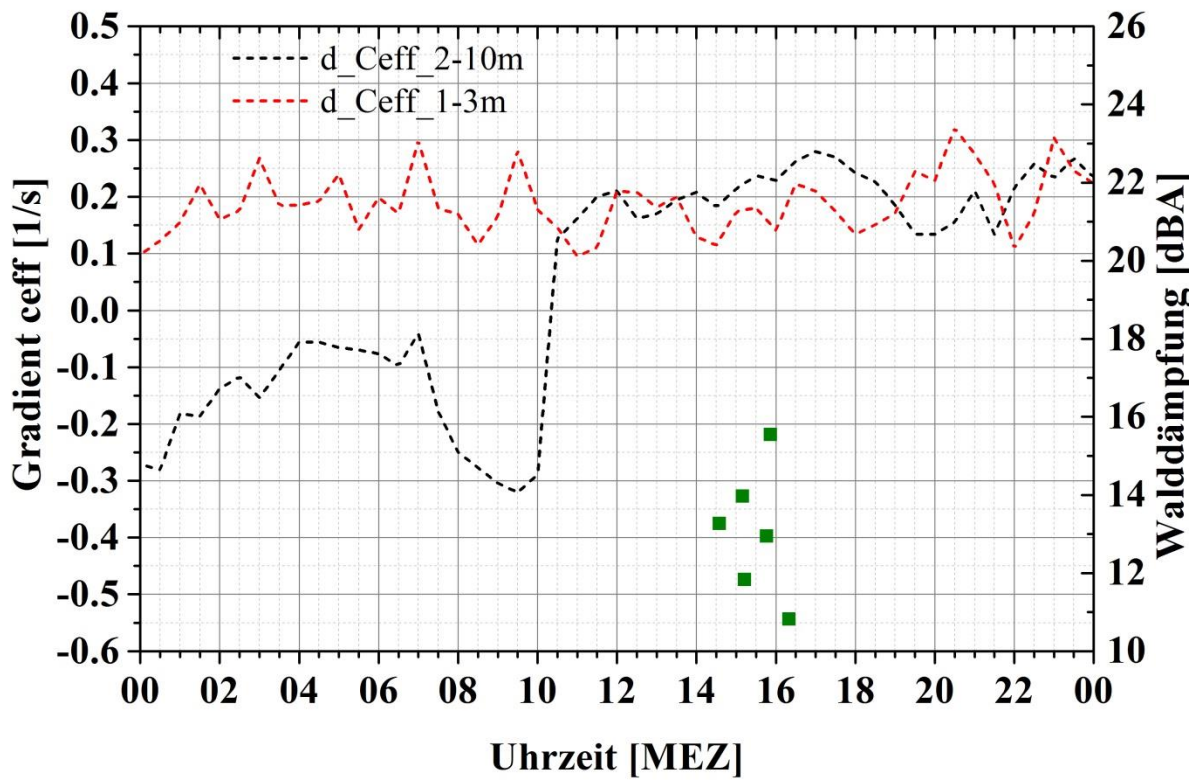


Abbildung 37: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit $ceff$ (unten), der vertikalen Gradienten von $ceff$ und der Walddämpfung (oben) am 17.03.2015

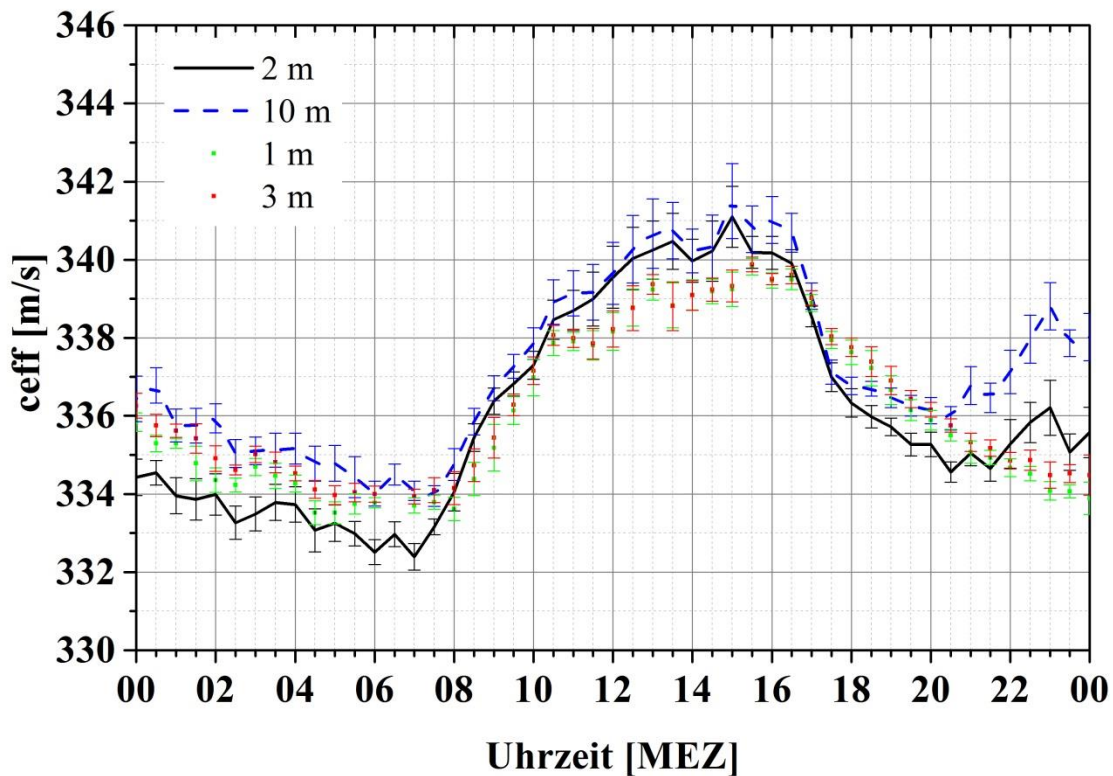
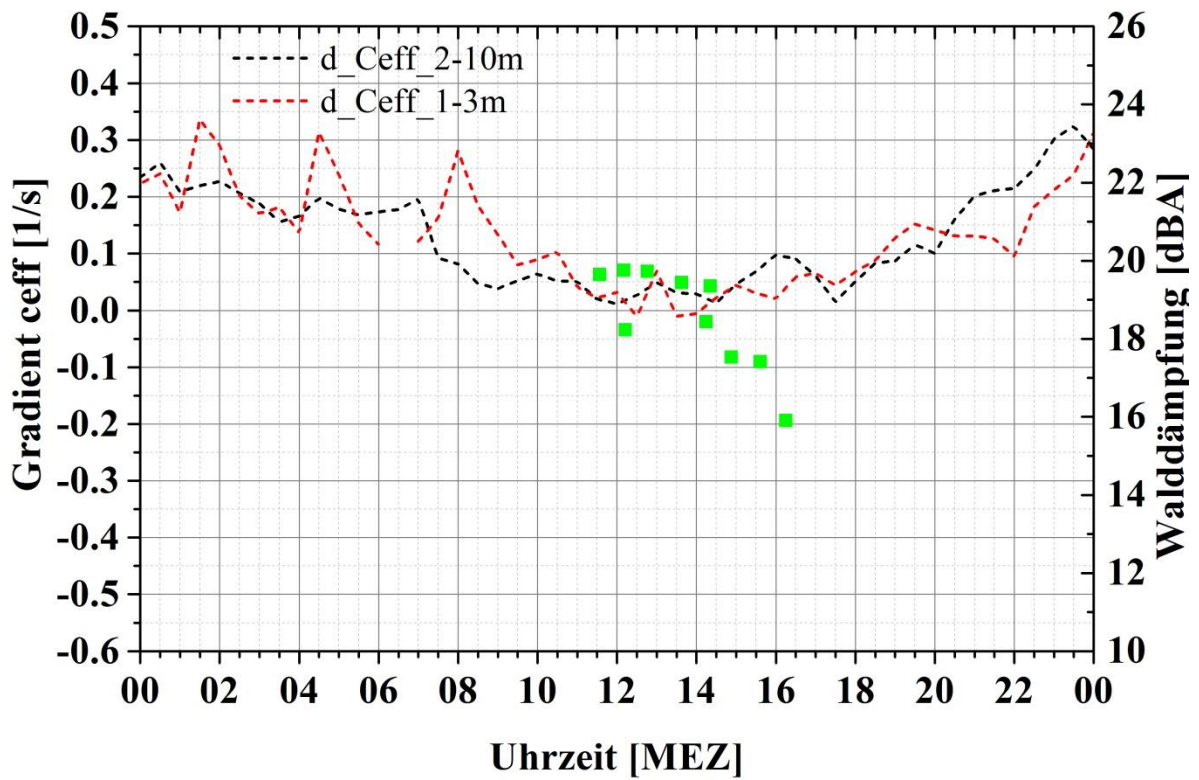


Abbildung 38: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 18.03.2015

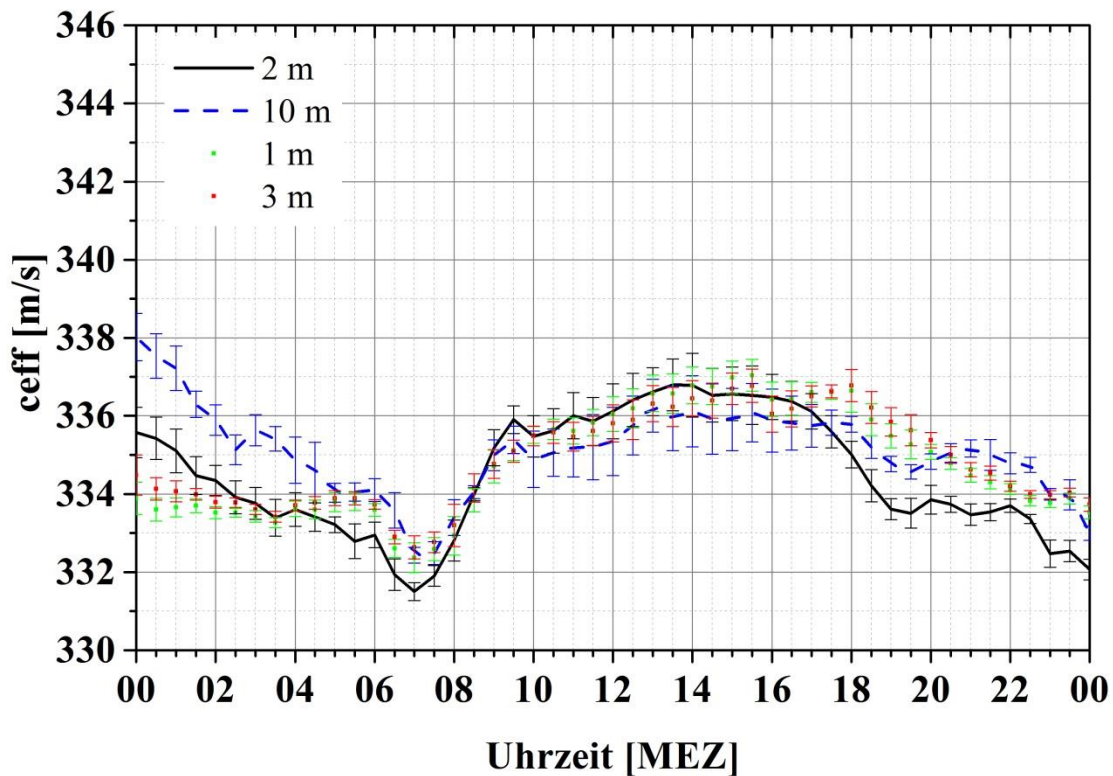
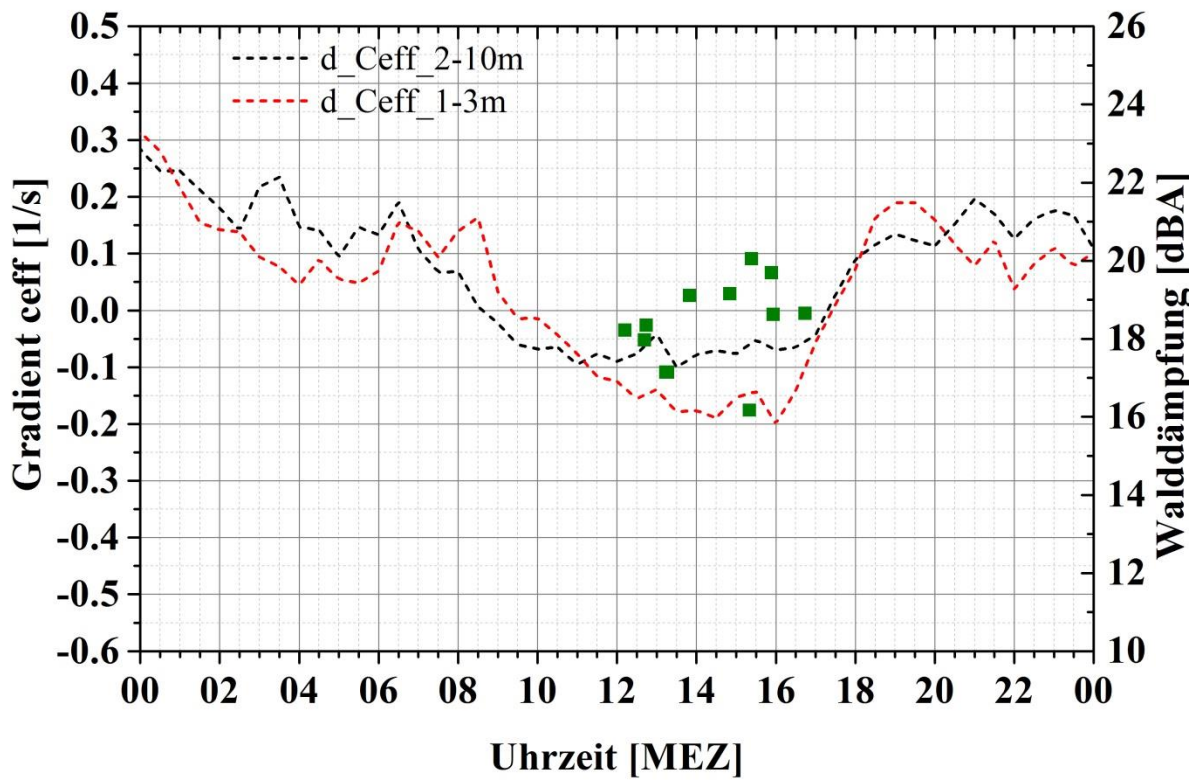


Abbildung 39: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 19.03.2015

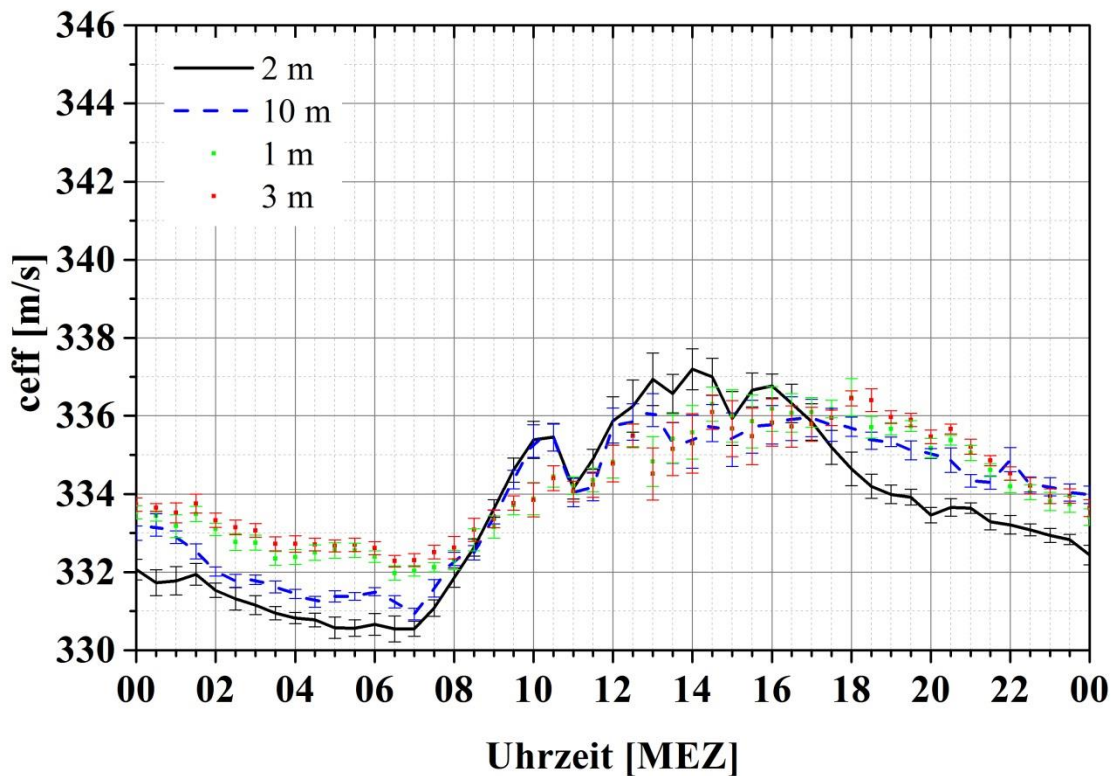
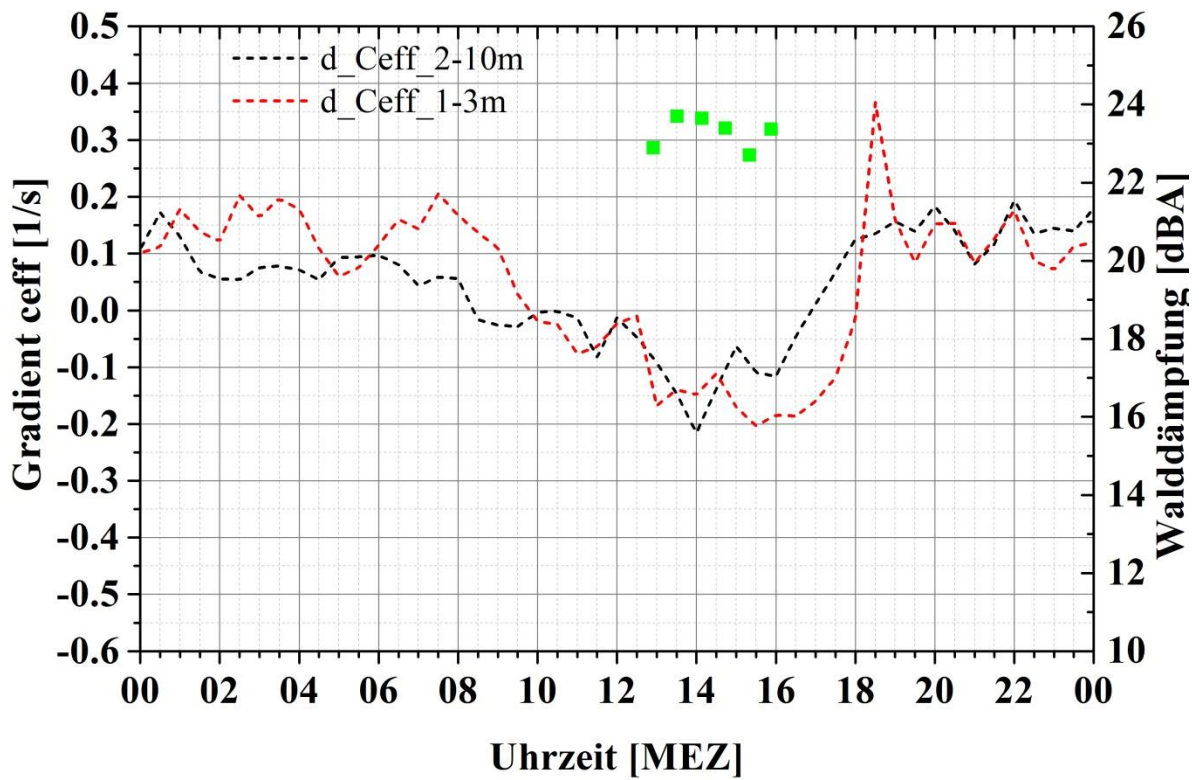


Abbildung 40: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 20.03.2015

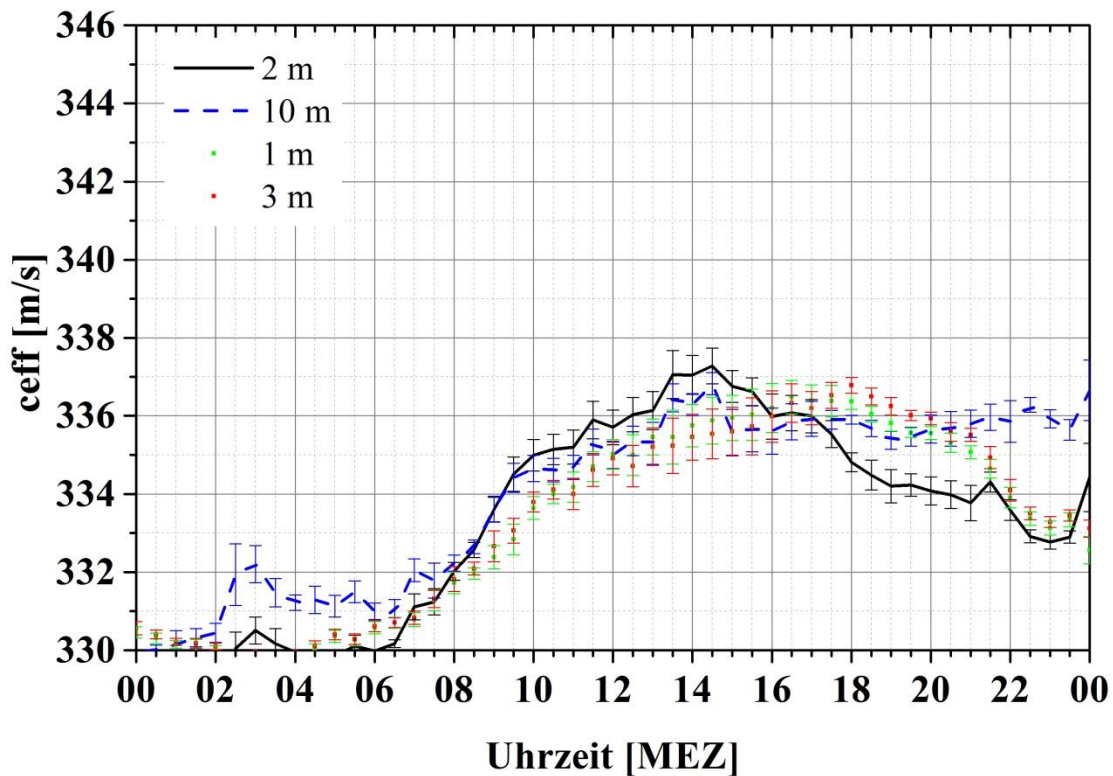
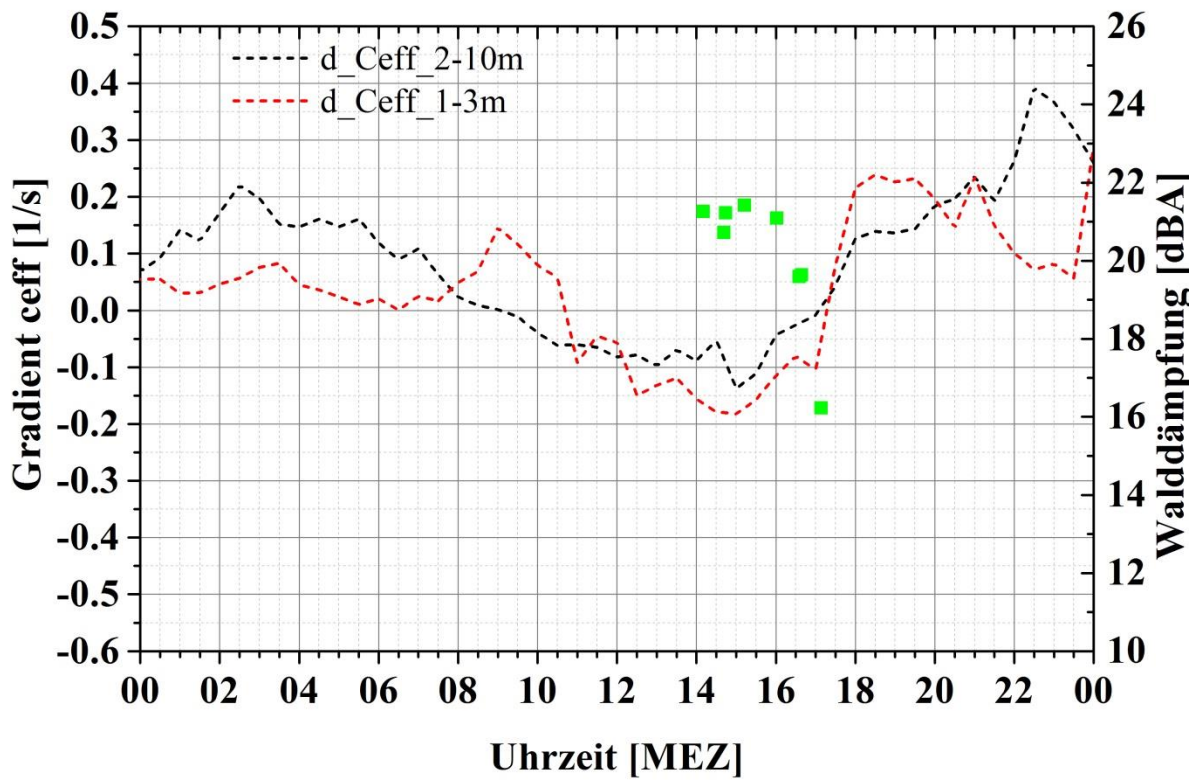


Abbildung 41: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit ceff (unten), der vertikalen Gradienten von ceff und der Walddämpfung (oben) am 23.03.2015

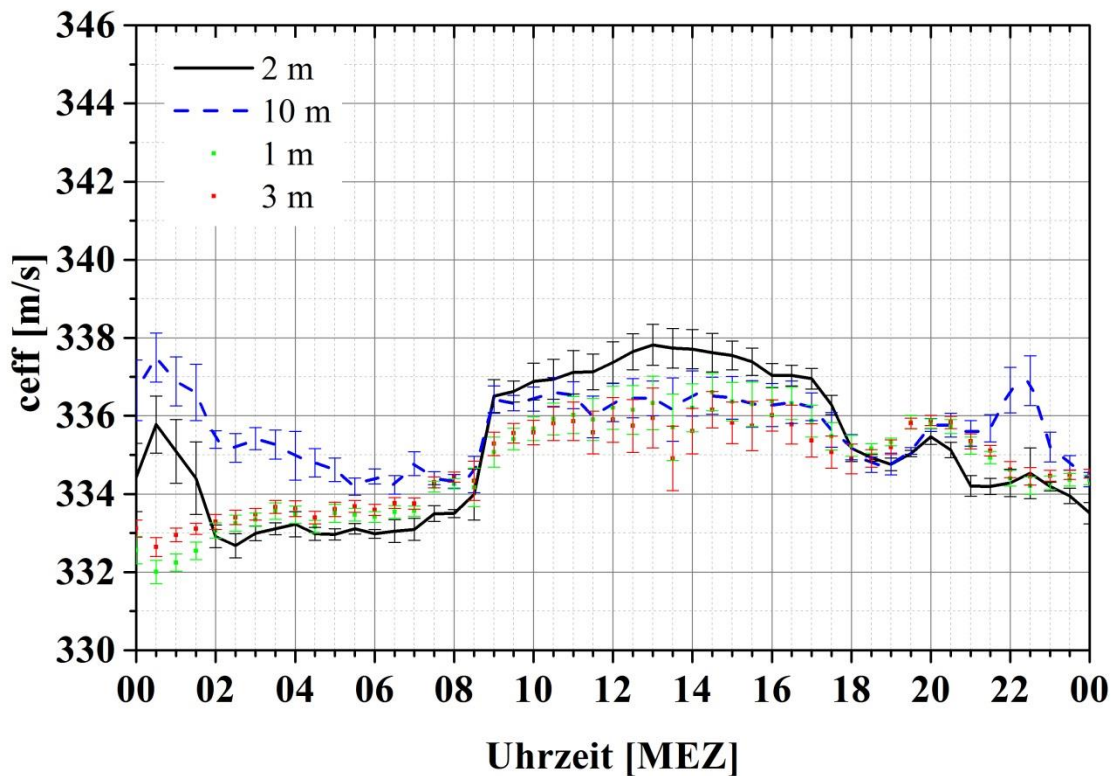
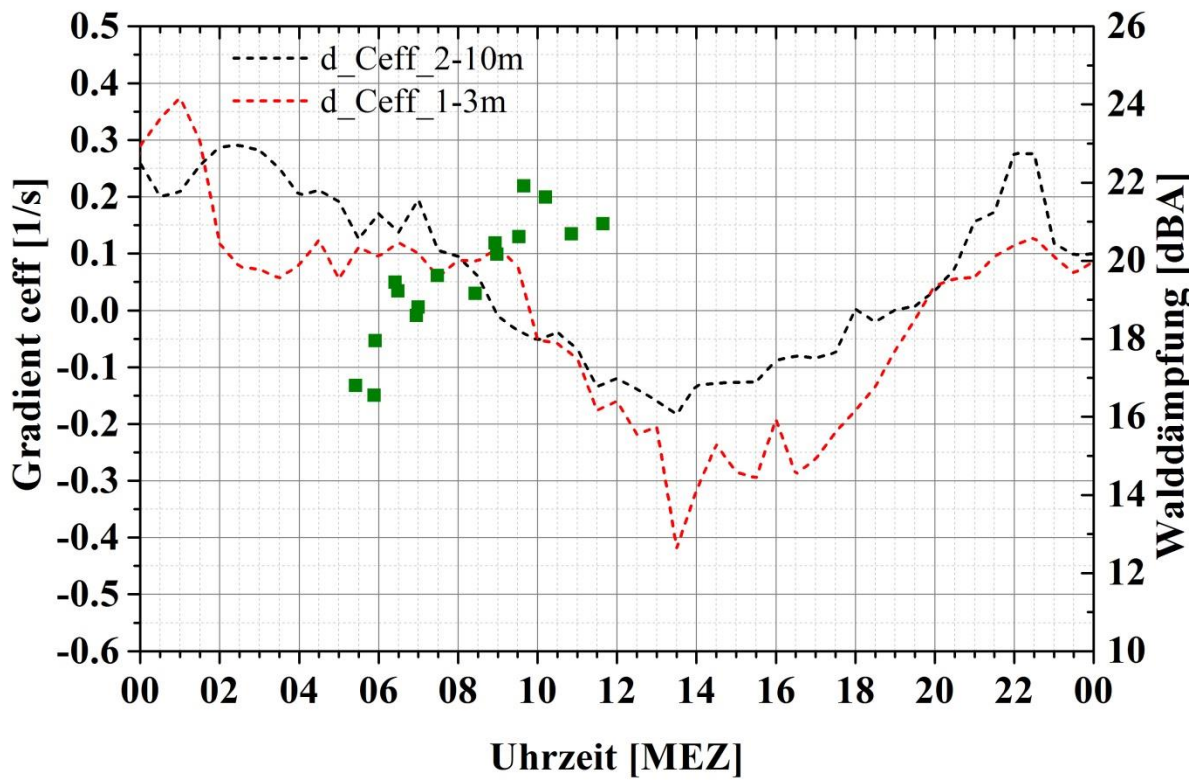


Abbildung 42: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 24.03.2015

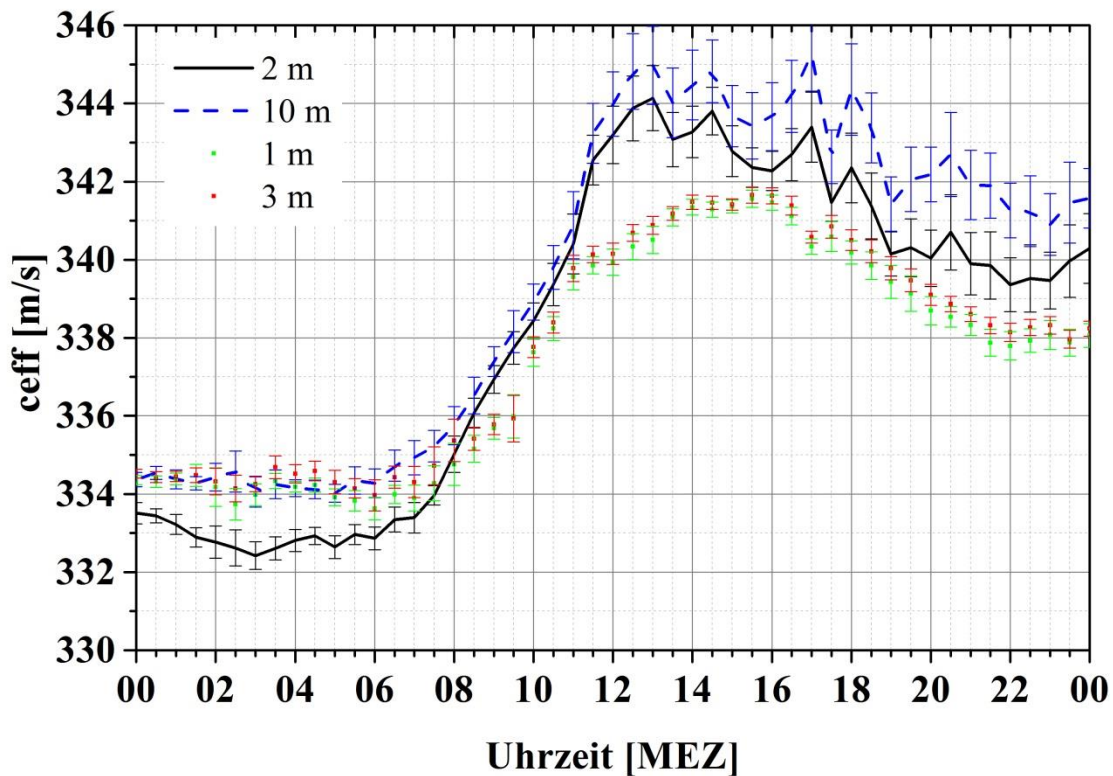
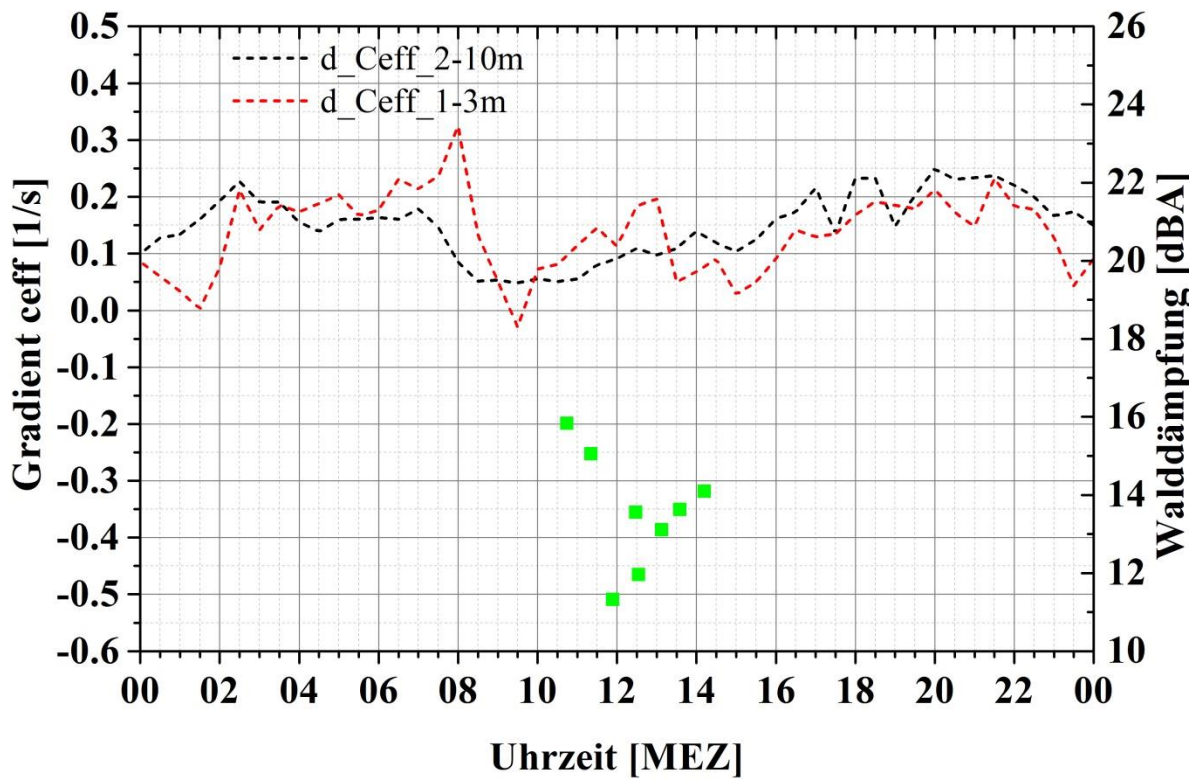


Abbildung 43: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit c_{eff} (unten), der vertikalen Gradienten von c_{eff} und der Walddämpfung (oben) am 25.03.2015

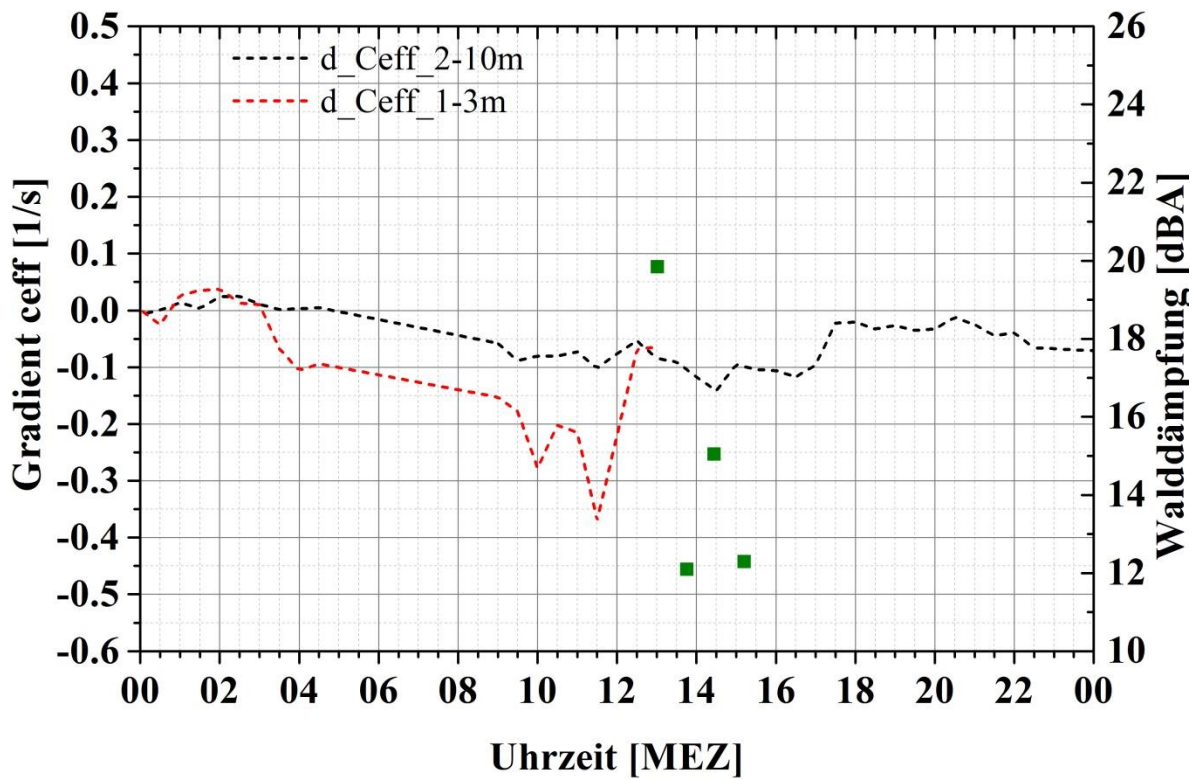


Abbildung 44: Tagesgang der effektiven Schallgeschwindigkeit $ceff$ (unten), der vertikalen Gradienten von $ceff$ und der Walddämpfung (oben) am 27.03.2015

Literaturverzeichnis

- ATTENBOROUGH, K.: Review of ground effects on outdoor sound propagation from continuous broadband sources. *Applied Acoustics* 24 (1988), S. 289-319
- ATTENBOROUGH, K.: Sound propagation in the atmosphere. In: Rossing, T. D. (Ed.): *Handbook of acoustics*, Springer (2007), S. 113-147
- ATTENBOROUGH, K., I. BASHIR, S. TAHERZADEH: Outdoor ground impedance models. *The Journal of the Acoustical Society of America* 129 (2011), S. 2806-2819
- DELANY, M. E., E. N. BAZLEY: Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics* 3 (1970), S. 105-116
- EMBLETON, T. F.: Tutorial on sound propagation outdoors. *The Journal of the Acoustical Society of America* 101 (1996), S. 31-48
- FRICKE, F.: Sound Attenuation in Forests. *Journal Sound Vibration* 92 (1984), S. 149-156
- PARKIN, P. H., W. E. SCHOLLES: The horizontal propagation of sound from a jet engine close to the ground, at Hatfield. *Journal Sound Vibration* 2 (1965), S. 353-374
- SALOMONS, E.M.: *Computational atmospheric acoustics*. Kluwer Academic Publishers (2001), 335 S.
- SWEARINGEN, M. E., M. J. WHITE: Influence of scattering atmospheric refraction and ground effect on sound propagation through a pine forest. *The Journal of the Acoustical Society of America* 122 (2007), S. 113-119

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-0
Telefax: + 49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Astrid Ziemann, Markus Hehn, Christian Bernhofer
Technische Universität Dresden/Fakultät Umweltwissenschaften
Professur für Meteorologie
PF 1117, 01735 Tharandt
Telefon: + 49 351 463-31346
Telefax: + 49 351 463-31302
E-Mail: astrid.ziemann@tu-dresden.de
Hans-Jörg Ederer, Christoph Stüber
Akustik Bureau Dresden Ingenieurgesellschaft mbH
Julius-Otto-Straße 13, 01219 Dresden
Telefon: +49|351|4711-568
Telefax: +49|351|4711-599
E-Mail: mail@abd-online.com

Redaktion:

Uwe Wollmann
LfULG, Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen/Referat Anlagenbezogener
Immissionsschutz, Lärm
Söbrigener Str. 3a, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-5201
Telefax: + 49 351 2612-5099
E-Mail: uwe.wollmann@smul.sachsen.de

Redaktionsschluss:

02.06.2016

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinarbeit des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.