




Grundwasserschutz 60


50 Jahre Lysimetermessnetz

 Ergebnisdokumentation und Nachschlagewerk



Baden-Württemberg

50 Jahre Lysimetermessnetz

 Ergebnisdokumentation und Nachschlagewerk



Baden-Württemberg

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe www.lubw.baden-wuerttemberg.de
BEARBEITUNG	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Referat 42 - Grundwasser
REDAKTION	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Referat 42 - Grundwasser
BEZUG	Diese Broschüre ist gedruckt für 15,- Euro oder kostenlos als Download im pdf-Format erhältlich bei der LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe unter: www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/6638/
ISSN	1437-0131 (Reihe Grundwasserschutz Bd. 60, 2019)
BILDNACHWEIS	Titelbild: LUBW Soweit nicht anders vermerkt, liegen die Rechte für die Bilder in diesem Bericht bei der LUBW.
STAND	Dezember 2018, 1. Auflage
DRUCK	printwork, 76694 Forst Gedruckt auf Recyclingpapier



Nachdruck - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

ZUSAMMENFASSUNG	7
1 EINFÜHRUNG	8
1.1 Zielsetzung	8
2 LYSIMETERMESSUNGEN	10
2.1 Sickerwasserbeschaffenheit	10
2.2 Sickerwassermenge	11
2.3 Niederschlagsmenge	12
2.4 Grundwasserstand	13
3 LYSIMETERTYPEN	14
3.1 Entstehung und Klassifikation	14
3.2 Das Standardlysimeter nach Friedrich-Franzen	15
3.3 Das wägbare Lysimeter (Station Büchig)	17
4 DAS LYSIMETERMESSNETZ	19
4.1 Messnetzziele	19
4.2 Messnetzumfang	19
4.3 Messnetzbetrieb und Beobachter-anweisungen	21
4.3.1 Organisation und Aufgaben	21
4.3.2 Bedienung der Niederschlagsmessstelle	21
4.3.3 Bedienung des Lysimeters	22
4.3.4 Datendienst	22
5 ERFAHRUNGEN UND ERKENNTNISSE	23
5.1 Zum Lysimeter nach Friedrich-Franzen	23
5.2 Zum Messnetzbetrieb	23
5.2.1 Grundsätzliche Erkenntnisse	23
5.2.2 Anlaufschwierigkeiten	24
5.2.3 Drifterscheinungen	24
5.2.4 Punktuelle Vorkommnisse	26
5.2.5 Unsicherheiten der Niederschlagsmessung	26
5.2.6 Hauptnutzung: Dauergrünland	27
5.2.7 Rückspülung	28
5.2.8 Rückbau	28
6 MESSERGEBNISSE LYSIMETERANLAGE BÜCHIG	29
6.1 Parameterumfang	29
6.2 Vergleichende Betrachtung der fünf Standardlysimeter nach Friedrich-Franzen	29
6.3 Ergebnisse am wägbaren Lysimeter	32

7	AUSWERTUNG DER LANGJÄHRIGEN LYSIMETERMESSUNGEN	35
7.1	Grundsätzliche Erkenntnisse	35
7.2	Statistische Mengenbetrachtungen und Auswertungen	36
7.2.1	Auswahl von Grundwasserstandsreferenzmessstellen	36
7.2.2	Summenkurven	36
7.2.3	Säulendiagramme ohne und mit langjährigem Hintergrund	37
7.2.4	Autokorrelation	39
7.2.5	Kreuzkorrelation	40
7.2.6	Weitere Auswertungsverfahren	42
7.3	Wesentliche Erkenntnisse	43
4	LITERATURVERZEICHNIS	45
	ANLAGE 1: MESSSTELLENDOKUMENTATION	46
	ANLAGE 2: LYSIMETERFORMULAR	121

Zusammenfassung

Das Lysimetermessnetz von Baden-Württemberg besteht mit Ausnahme des wägbaren Lysimeters Büchig aus Standardlysimetern nach Friedrich-Franzen mit 1 m² Auffangfläche. Dieser Lysimetertyp wird bundesweit eingesetzt und hat sich für die Abschätzung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung aus Niederschlägen bewährt. Sein Einsatzbereich ist allerdings auf grundwasserferne Lockergesteinsbereiche beschränkt.

Lysimeter sind empfindliche Messeinrichtungen, die im Laufe der Jahre durch Änderungen im Sickerverhalten beeinträchtigt werden können. Anlagen unter bewirtschafteten Flächen insbesondere unter Ackerland sind äußeren Einwirkungen besonders stark ausgesetzt und altern im Regelfall schneller als Anlagen unter Grünland.

Es wurden weder signifikante noch systematische Unterschiede zwischen den gestochenen Monolithen und sorgfältig eingerichteten gestörten Anlagen beobachtet.

Lysimetermessungen sind das Resultat aus dem Zusammenspiel von zahlreichen standortspezifischen Eigenschaften und Randbedingungen und weisen auf engstem Raum zum Teil signifikante Unterschiede auf, selbst unter gleichartigen Randbedingungen. Demnach sollen Lysimeterdaten lediglich als Schätzwerte der Sickerate bzw. der Grundwasserneubildung aus Niederschlägen an einem Standort gewertet werden. Die Regionalisierung dieser Sickeraten ist im Grunde nicht zulässig.

Lysimeter mit einer langen Beobachtungshistorie sind kostbare Anlagen, die es zu pflegen und erhalten gilt. Die Zeitreihe einer ausgefallenen bzw. stillgelegten Anlage kann nicht durch den Bau einer neuen Anlage weitergeführt werden, selbst wenn diese in unmittelbarer Nähe liegt.

Die Prognose der Änderung der Grundwasservorräte anhand von Daten der wägbaren Lysimeter hat sich seit vielen Jahren bewährt. Zurzeit wird lediglich eine derartige Anlage im Raum Karlsruhe betrieben. Die angestrebte Einrichtung von neuen Anlagen würde regional differenzierte Vorhersagen möglich machen.

Eine Ausweitung des Lysimetermessnetzes in Festgesteinsbereichen ist bis dato nicht vorgesehen. Die Auswertung von sogenannten Naturlysimetern unter den Quellen Baden-Württembergs erscheint zielführender. Naturlysimeter verfügen über ein eindeutig abgegrenztes unterirdisches Einzugsgebiet, das aufgrund von unterlagernden undurchlässigen Gesteinshorizonten von den Grundwassersystemen in der Umgebung abgekoppelt ist. Das Einzugsgebiet wird durch einzelne oder mehrere Quellen vollständig entwässert. Die Messung der Quellschüttung ermöglicht eine Abschätzung des Wasserhaushalts im Einzugsgebiet im Sinne eines Großlysimeters.

1 Einführung

1.1 Zielsetzung

Die Grundwasserneubildung aus Niederschlägen ist eine der wichtigsten Komponenten des Grundwasserhaushalts und von entscheidender Bedeutung für die Wiederauffüllung der Grundwasservorräte nach Trockenzeiten. Sie spielt eine wesentliche Rolle bei der Sicherstellung von Trink- und Brauchwasserversorgung, die in Baden-Württemberg zu knapp drei Vierteln aus den natürlichen Grundwasservorkommen gewonnen wird. Die Grundwasserneubildung stellt vereinfacht die Bilanzgröße aus Niederschlag abzüglich Verdunstung und Oberflächenabfluss dar.

Im zeitlichen Verlauf der Grundwasserstände zeigen sich die Abfolgen von Perioden über- und unterdurchschnittlicher Niederschläge und der von ihnen beeinflussten, jahreszeitlich unterschiedlichen Versickerungsraten. Dabei unterliegen Niederschläge sowohl jahreszeitlichen als auch längerfristigen sowie auch räumlichen Schwankungen. Auch die Grundwasserneubildung aus Niederschlägen unterliegt normalerweise einem ausgeprägten Jahreszyklus mit hohen Sickerraten im Winter und einer geringen Ausbeute im Sommer. In extrem nassen oder trockenen Perioden treten oft auch Abweichungen im Jahreszyklus auf.

Die nachhaltige Nutzung der Grundwasserressource setzt den effizienten Schutz und die Überwachung der Grundwasservorkommen voraus. Die quantitative Beschreibung der Grundwasserhältnisse und der dafür maßgebenden Faktoren ist ein wichtiger Bestandteil des Grundwasserüberwachungsprogramms in Baden-Württemberg. Neben Grundwasserstandsmessstellen und Quellen werden deshalb auch Lysimeter zur Abschätzung der versickernden Niederschlagsanteile betrieben.

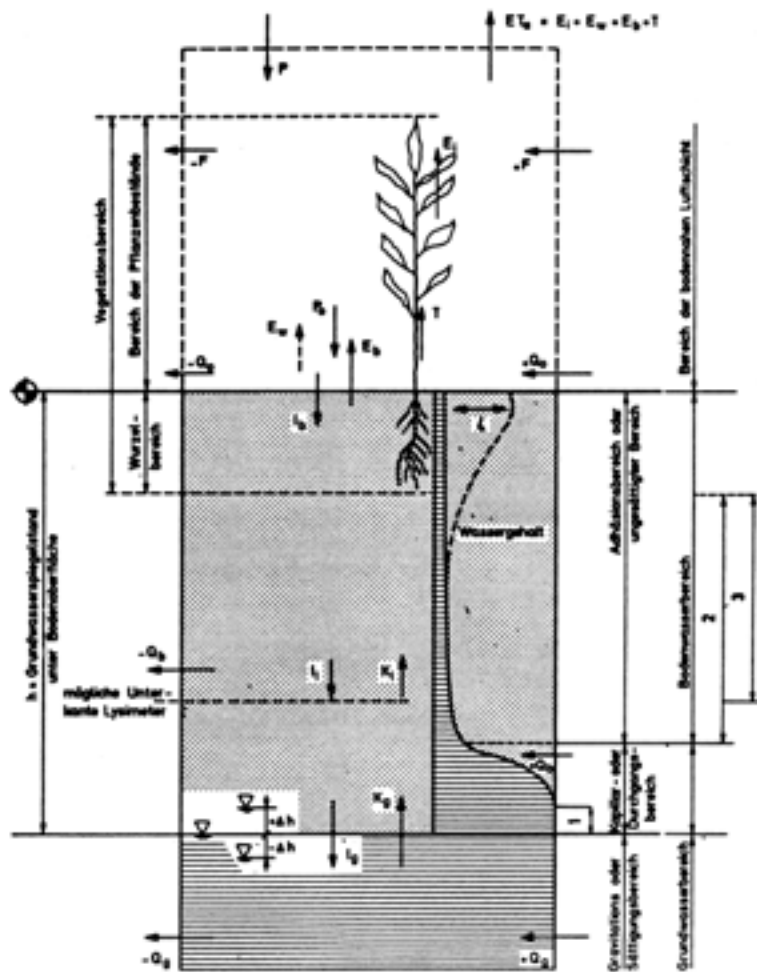
Lysimeter stellen ein wesentliches Hilfsmittel zur Quantifizierung der Wasserhaushaltsgrößen im Untergrund dar, insbesondere für die Beobachtung des in den Untergrund infiltrierenden Niederschlagswassers und die Erkennung der unterschiedlichen Fließwege. Es handelt sich um mit Boden gefüllte Messvorrichtungen bzw. Gefäße, die in den Boden senkrecht eingebaut oder gestochen werden und an

ihrer Sohle einen Abgang für das versickernde Bodenwasser besitzen. Es soll dabei sichergestellt werden, dass derjenige Teil des versickernden Niederschlagswassers erfasst wird, der den Grundwasserkörper erreichen würde. Bei einem Standardlysimeter soll die Unterkante des Auffangbehälters daher oberhalb des maximalen Grundwasserspiegels und unterhalb der Wurzelzone liegen (siehe Abbildung 1-1). Die aufgefangene Wassermenge ermöglicht unter diesen Voraussetzungen die mengenmäßige Abschätzung der lokalen Grundwasserneubildung aus Niederschlägen bei definierten Standorteigenschaften wie Boden, Gestein, Bewuchs, Klima und sonstigen Randbedingungen.

Lysimeter liefern unentbehrliche Feldmessungen für die Validierung von Wasserhaushaltsgleichungen und wichtige Eingangsdaten für die Kalibrierung von Bodenwasserhaushaltsmodellen, beispielsweise für das in Baden-Württemberg flächendeckend eingesetzte Modell GWN-BW.

Das Einsatzgebiet der Lysimeter liegt vornehmlich in ausreichend mächtigen Lockergesteinen. Im Festgesteinsbereich sind andere Verfahren und Messeinrichtungen besser geeignet.

Das Lysimetermessnetz von Baden-Württemberg besteht mit Ausnahme des wägbaren Lysimeters Büchig aus Standardlysimetern nach Friedrich-Franzen mit 1 m² Auffangfläche. Dieser Lysimetertyp wird bundesweit eingesetzt und hat sich für die Abschätzung des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung aus Niederschlägen bewährt. Sein Einsatzbereich ist allerdings auf grundwasserferne Lockergesteinsbereiche beschränkt.



Schema zum Bodenwasserkreislauf nach KOVACS (1973), modifiziert. Erklärung der Symbole siehe Tafel

- 1 = geschlossener Kapillarbereich
- 2 = immerfeuchter, nicht durchwurzelter Haftwasserbereich außerhalb des Lysimeters
- 3 = wie 2, jedoch durch Sickerwasserstau im Lysimeter (Ausbildung einer Kapillarzone) eingeschränkt
- 4 = Wassergehaltsschwankung im Wurzelbereich

Erklärung der Symbole

Niederschlag	P	Kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser	K_g
Bestandsniederschlag	P_0	Kapillarer Aufstieg aus dem Sickerwasserstau des	
Wasserdampftransport in der bodennahen Luftschicht	F	Lysimeters	K_l
Aktuelle Evapotranspiration	ET_a	Oberlandfließen	Q_o
Interzeptionsverdunstung	E_i	Zwischenabfluß (Interflow)	Q_b
Evaporation von freien Wasserflächen	E_w	Grundwasserabfluß	Q_g
Evaporation von Bodenoberflächen	E_b	Änderung des Wasservorrats an der Erdoberfläche . .	ΔS_o
Evaporation, allgemein	E	im Boden	ΔS_b
Transpiration	T	im Grundwasser	ΔS_g
Infiltration (in den Boden)	I_b	Speichernutzbarer Porenanteil	n_{sp}
Sickerwasserablauf aus einem Lysimeter	I_l	Logarithmus der Bodensaugspannung in cm Wasser-	
Grundwasserneubildung (kurzfristig)	I_g	säule	pF
Grundwasserneubildung (langfristig)	G	Flurabstand des Grundwassers	h
Kapillarer Wasseraufstieg	K	Änderung des Grundwasserstandes	Δh

Abbildung 1-1: Schematischer Bodenwasserkreislauf (aus [1])

2 Lysimetermessungen

Lysimeteruntersuchungen stellen ein wesentliches Hilfsmittel zur Quantifizierung von Wasser- und Stoffströmen in Böden dar. Die Besonderheit der Lysimetrie ist, dass mit ihr alle wesentlichen Komponenten der Wasserbilanz erfasst werden können. Lysimeter ermöglichen eine Kopplung von Labor- und Freilandversuchen. Für Untersuchungen von Boden und Sickerwasserzone stellen Lysimeteruntersuchungen ein wichtiges Bindeglied zwischen den Versuchen in kleinskaligen Laboranordnungen und der Übertragung ihrer Ergebnisse im Freiland dar.

Lysimeteranlagen wurden ursprünglich zur Untersuchung der gelösten Wasserinhaltsstoffe entwickelt und werden nach wie vor vielerorts für die Beprobung des Bodensickerwassers und die Ermittlung des Stofftransports bzw. der Auswaschung eingesetzt. Im Lysimetermessnetz des Landes stehen die quantitativen Betrachtungen jedoch im Vordergrund.

2.1 Sickerwasserbeschaffenheit

Eine zumindest stichprobenartige Überwachung von Niederschlags- und Sickerwasserbeschaffenheit kann frühzeitig Hinweise auf mögliche Veränderungen von Menge und Zustand des Grundwassers geben. Ergänzend zu Regensammlern und Niederschlagsmessstellen haben sich Lysimeter als geeignete Messeinrichtungen des Sickerwassers zur Beobachtung der Vorgänge im Lockergestein bewährt [1].

Die vergleichende Untersuchung zwischen dem atmosphärischen Stoffeintrag in den Boden und der Sickerwasserbeschaffenheit erfordert eine stoffbezogene Bestimmung des Niederschlags (Trocken- und Nassdeposition) und des Sickerwassers. Der Umfang der chemischen Analysen richtet sich nach den Untersuchungszielen, wobei die Beprobung, Konservierung und Analytik erhebliche Schwierigkeiten bereiten [2]. Die damit verbundenen hohen Investitions- und Betriebskosten der geeigneten Lysimeteranlagen sowie die erschwerte Interpretation der Messergebnisse aufgrund des im Einzelnen sehr empfindlichen Verhaltens der Sickerwasserinhaltsstoffe führen dazu, dass die Sickerwasserbeschaffenheit nur in Einzelfällen untersucht wird.



Abbildung 2.1-1: Lysimeteranlage Schriesheim im Rhein-Neckar-Raum. Im Vordergrund der Regenmesser nach Hellman (GW-Nr. 0400/305-7). Der Lysimeterbehälter (GW-Nr. 0500/305-3) wurde an der mit Fluchtstäben markierten Stelle eingebaut.



Abbildung 2.1-2: Lysimeteranlage Weisweil am Kaiserstuhl. Der Lysimeterbehälter (GW-Nr. 0500/068-5) wurde unter einer Ackerfläche an der mit Fluchtstäben markierten Stelle eingebaut.

Bei der Gewinnung von Umweltdaten sind prinzipiell hohe Anforderungen an die Qualität der erhobenen Messwerte zu stellen, da hier häufig Konzentrationen im Bereich der Nachweisgrenze auftreten. Die Probennahme und Konservierung sowie die Analytik spielen im gesamten Prozess der Datenbeschaffung zentrale Rollen. Deshalb müssen die Bedingungen für Probennahme und Analytik detailliert vorgegeben werden. Die Grundsatzpapiere und technischen Anleitungen aus dem Grundwasserüberwachungsprogramm Baden-Württemberg für die Grundwasserprobennahme müssen berücksichtigt werden [5].

Folgende Randbedingungen und Schwierigkeiten sind bei der Beprobung und Analyse des Sickerwassers besonders zu beachten:

- Die Kontroll- und Beobachtungsschächte erfüllen nicht die notwendigen Anforderungen für die Lagerung und Konservierung des Sickerwassers, das bis zu mehreren Tagen mit Luftkontakt und ungekühlt im Messeimer steht. Eine lichtgeschützte Lagerung ist jedoch gewährleistet.
- Aus analytischen Gründen sind je nach zu ermittelndem Stoff Mindestwassermengen erforderlich. Die erforderlichen Sickerwassermengen können durch den Einsatz von größeren Lysimeterauffangflächen bzw. durch zusätzliche Lysimeter und Mischproben über mehrere Tage erhöht werden. Es ist dabei zu bedenken, dass der Sickerwasseranfall über das Jahr sehr unregelmäßig verteilt ist und in den Sommermonaten die Sickerung wochen- bis monatelang sogar gegen Null geht. Die zulässige Lagerungsdauer hängt vom zu analysierenden Stoff und von der gewählten Konservierungsmethode ab [4].
- Die Sickerwasserzusammensetzung kann durch das verwendete Material des Lysimeterbehälters, der Ablaufleitung in den Kontrollschacht und des Messeimers beeinflusst werden. Die zu beobachtenden Konzentrationsveränderungen – insbesondere von Schwermetallen und organischen Spurenstoffen – nehmen mit steigender Kontakt- bzw. Verweilzeit zu.

Die chemische Analyse der atmosphärischen Deposition und des Sickerwassers wird im Rahmen des Lysimetermessnetzes des Landes seit etwa 1990 nicht mehr durchgeführt. Die bislang umfangreichsten Untersuchungen erfuhren die Landeslysimeter und deren Messdaten im Rahmen des Forschungsprojekts „Nitrat im Grundwasser“ [1]. An ausgewählten sechs Lysimetern wurden zusätzlich zu den laufenden Mengenmessungen zweimal wöchentlich Sammelproben genommen, um Erkenntnisse über die Nitrat- auswaschung aus landwirtschaftlich genutzten Flächen zu gewinnen.

2.2 Sickerwassermenge

Im Lysimetermessnetz steht die Betrachtung der Sickerwassermenge im Vordergrund. Es gilt dabei, die zeitlichen und mengenmäßigen Auswirkungen des Niederschlagsgeschehens auf den Wasserhaushalt und das Grundwasserangebot zu untersuchen. Aus diesem Grund gehört zur Grundausrüstung sämtlicher Lysimeteranlagen neben dem Sickerwasserauffangbehälter ein Niederschlagsmessgerät, um die standortspezifische Witterung in der gleichen zeitlichen Diskretisierung wie das Sickerwasser erfassen zu können.

Bei ordnungsgemäßer Messvorrichtung ist gewährleistet, dass die gemessene Sickerwassermenge der Grundwasserneubildung aus Niederschlägen entspricht, wobei diese zeitverzögert eintritt. Die benötigte Fließzeit zwischen der Unterkante des Lysimeterbehälters und der Grundwasser- oberfläche ist bei der Bestimmung des genauen Neubildungszeitpunktes zu berücksichtigen. In der Praxis spielt dieser Aspekt bei der Koppelung von Bodenwasserhaus- haltsmodellen und Grundwassermodellen eine wichtige Rolle. Bei der Betrachtung längerer Zeitabschnitte mit ag- gregierten Monats- bzw. Jahressummendaten verliert dieser Umstand an Bedeutung.

Grundwasserfreie Lysimetermessstellen werden so ange- legt, dass außer den Niederschlägen keine weiteren Was- serzutritte – beispielsweise Hangwasser, Beregnungsan- lagen oder ausufernde Fließgewässer – in den Messbereich gelangen können. Bei ordnungsgemäßem Einbau ent- spricht die gemessene Sickerwassermenge dem grundwas- serbürtigen Abfluss bzw. der Grundwasserneubildung.

Die wesentlichen natürlichen Vorgänge, die für einen Tropfen Niederschlagswasser zwischen dem Niederschlags- ereignis und der Erreichung des Grundwasserspiegels bzw. auf der Strecke durch die ungesättigte Bodenzone relevant sind, werden mit der nachfolgenden Bilanzgleichung be- schrieben:

$$NB = Sick = P - Ei - Eo - Et + Qo + Qif - K + Sp \pm Zt [1]$$

Sämtliche Größen in [mm] pro [Zeiteinheit] mit

- NB = grundwasserbürtiger Abfluss bzw. Neubildung aus Niederschlägen
- Sick = Sickerwassermenge
- P = Niederschlagsmenge
- Ei = Interzeptionsverdunstung und Evapotranspiration durch den Pflanzenbestand; dieser Niederschlagsanteil verdunstet vor Erreichung der Bodenoberfläche.
- Eo = Evaporation bzw. Verdunstung an der Geländeoberfläche; dieser Niederschlagsanteil verdunstet nach Erreichung der Bodenoberfläche, z.T. nach Bildung von Wasserflächen (Pfützen).
- Et = Transpiration durch die Pflanzen von Bodenwasser aus der Wurzelzone
- Qo = Direktabfluss an der Geländeoberfläche; die Wassermengen, die über Land abfließen, nehmen mit zunehmender Hangneigung und Niederschlagsintensität zu. Zuflüsse aus benachbarten Lagen müssen berücksichtigt werden.
- Qif = Zwischenabfluss (Interflow)
- K = kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser
- Sp = Veränderung der Bodenwasserspeicherfüllung (Erholung durch einsickernde Niederschläge / Entleerung durch Abfluss in den Untergrund, kapillaren Aufstieg oder Pflanzenverbrauch)
- Zt = Fremdwasserzutritt oder Entnahme

Von diesen 10 Bilanzgrößen werden lediglich 2 unmittelbar erfasst, nämlich die Niederschlagsmenge [P] und die Sickerung [Sick] bzw. [NB]. Drei weitere Parameter können bei richtiger Standortauswahl und ordnungsgemäßigem Lysimereinbau vernachlässigt werden: der Direktabfluss an der Geländeoberfläche [Qo], der Interflow [Qif] und die Fremdeinwirkungen [Zt].

Bei nicht wägbaren Lysimetern bzw. Standardlysimetern können die restlichen fünf Komponenten [Ei], [Eo], [Et], der kapillare Aufstieg [K] und [Sp] nicht näher differenziert und müssen als Restglied [Rnw] der Gleichung [1] abgeleitet werden (siehe Gleichung [2]). Es ist dabei nicht möglich abzuschätzen, ob sich der Bodenwasserspeicher in einer Erholungs- oder einer Entleerungsphase befindet bzw. das Vorzeichen von [Sp] ist ungewiss. Der Parameter [K] kann im Regelfall bei ordnungsgemäßigem Lysimerein-

bau bzw. bei ausreichendem Flurabstand vernachlässigt werden.

$$NB = Sick = P - [Ei + Eo + Et - Sp + K] = P - Rnw [2]$$

Bei sogenannten wägbaren Lysimetern ermöglicht die Messung des Lysimetergewichts – bestehend aus der Bodenmatrix und des darin enthaltenen Bodenwassers – eine Abschätzung der Entwicklung der Bodenwasserspeicherfüllung [Sp]. Da das Gewicht des Bodenkörpers im Lysimetergefäß gleich bleibt, gehen die gemessenen Gewichtsänderungen ausschließlich auf das Konto der Veränderung der enthaltenen Wassermenge. Der Gesamteffekt der Verdunstungskomponenten [Ei], [Eo], und [Et] sowie des kapillaren Aufstiegs [K] wird dann als Restglied [Rw] in Gleichung [1] berechnet (siehe Gleichung [3]).

$$NB = Sick = P + Sp - [K + Ei + Eo + Et] = P + Sp - Rw [3]$$

Der kapillare Aufstieg aus dem Grundwasser, der zu einer Minderung der Grundwasserneubildung führt, kann aus baulichen Gründen durch ein Lysimeter meist nicht erfasst werden (siehe Kapitel 3.2). Neben dem Ortsniederschlag empfiehlt es sich daher, noch weitere klimatische und bodenkundliche Standortinformationen für die Interpretation von Lysimeterdaten heranzuziehen. Der allgemeine Wasserkreislauf im Boden ist in Abbildung 1-1 schematisch dargestellt.

2.3 Niederschlagsmenge

Standortscharfe Niederschlagsdaten sind für die Aus- und Bewertung von Lysimeterdaten zwingend erforderlich. Dabei besteht grundsätzlich die Möglichkeit, räumlich interpolierte DWD-Daten zu verwenden. Sehr empfehlenswert ist die Verwendung eines unmittelbar am Lysimeterstandort aufgestellten Niederschlagsmessgeräts, das synchron mit dem Lysimeter beobachtet wird. In Baden-Württemberg sind Regenmesser daher feste Bestandteile der Lysimeteranlagen. Bei den Regenmessern handelt es sich um Niederschlagsmesser nach Hellmann (DWD-Ausführung) mit 200 cm² Auffangfläche, die mit oder ohne Windschutz ausgestattet und im Regelfall in 1 m über Flur oder in Bodenhöhe installiert sind.

Es wäre ratsam, die Geräte in Erdbodenhöhe zu installieren. Die meisten Regenmesser werden dennoch meist in 1 m Höhe aufgestellt, um vergleichbare Verhältnisse mit den Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes zu schaffen. Es ist bekannt, dass die gemessene Niederschlagsmenge nach DWD-Vorgaben die tatsächlichen Werte in Geländeoberkantenhöhe um 8 bis 10% unterschätzt. Durch die Montage einer Windschutzvorrichtung kann diese Abweichung an Freilandstandorten, die den Windinflüssen besonders stark ausgesetzt sind, vermindert werden.

Der Raum über der Niederschlagsmessstelle sollte im Übrigen in einem Einfallswinkel von 45° frei sein von Bäumen oder Gebäuden.



Abbildung 2.3-1: Die beiden Regenmesser nach Hellmann der Lysimeteranlage Egelsee im Illertal. Im Vordergrund der Regenmesser mit Windschutz (GW-Nr. 0403/769-4) und dahinter ein bodeneben aufgestelltes Gerät (GW-Nr. 0402/769-9). An diesem Standort ist kein freier Einfallswinkel von 45° vorhanden (siehe Bäume rechts im Bild).

2.4 Grundwasserstand

Lysimeterdaten liefern Grund- und Vergleichsdaten für Bilanzbetrachtungen und für modellgestützte Bewirtschaftungsuntersuchungen. Ergänzend zu den Niederschlags- und Sickerwassermessstellen ist es zweckmäßig, möglichst umfangreiche standorttypische Hinweise über die Grundwasserneubildung aus Niederschlägen z.B. Grundwasserspiegelanstiege zu messen. Die Beobachtung der Grundwasserdynamik im Umfeld der Lysimeteranlage trägt dazu bei, die Bedeutung des Neubildungsgeschehens für die Entwicklung der Grundwasservorräte besser abzuschätzen. Aus diesem Grund wurde in Baden-Württemberg für jeden Lysimeterstandort ein Referenzpegel für den Grundwasserstand festgelegt.

Diese Referenzmessstellen aus dem Grundwasserstandsmessnetz sollten in unmittelbarer Nähe der Lysimeteranlage liegen. Bei großräumigen Grundwassersystemen wie dem Oberrheingraben ist diese Nähe jedoch nicht zwingend erforderlich. Im Übrigen sollten sie möglichst unbeeinflusst und in ausreichender Entfernung von Fließgewässern und Entnahmestellen niedergebracht sein.

Zu der Auswertung von Lysimeterdaten gehört seit einigen Jahren die Darstellung der Grundwasserstands-Ganglinien der Referenzmessstellen.

3 Lysimetertypen

3.1 Entstehung und Klassifikation

Das Urlysimeter wurde vermutlich in Frankreich vom Mathematiker und Astronom Philippe de la Hire (1640-1718) erfunden. Seit den 1930er Jahren wurde die Technik von zahlreichen Wissenschaftlern weiterentwickelt. Sie wurde mit dem Ziel verfeinert, spezifische Standorteigenschaften (z. B. Grundwasserlysimeter für den Einsatz in Bereichen mit geringem Flurabstand oder Großlysimeter an Waldstandorten) besser berücksichtigen zu können oder Fehlerquellen zu minimieren (z. B. Unterdrucklysimeter zur Verhinderung des Sickerwasserstaus).

Lysimeter bestehen aus einem mit Erdboden gefüllten Behälter und einer Auffang- und Messvorrichtung für das am Behälterboden austretende Wasser [6]. Mit ihnen ist die Messung des Sickerwasserablaufs und teilweise auch der Wasserbewegung in vertikaler Richtung im Boden möglich. Zur Erfassung der klimatischen Standortbedingungen, die zur Interpretation der Messdaten erforderlich sind, werden zusätzliche Geräte, wie z.B. Niederschlagsmesser oder Klimastationen, eingerichtet.

Lysimeter werden üblicherweise nach ihren baulichen Eigenschaften charakterisiert. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um:

- Größe und Ausbildung des Lysimeter(auffang)-behälters,
- gestörte oder ungestörte Einbringungsart des Bodens,
- Einbautiefe,
- Bodenart bzw. Bodentyp,
- Wägbarkeit,
- Vorhandensein von Grundwasser und/oder Unterdruck,
- Bewuchs bzw. Landnutzung.

Zahlreiche Lysimetertypen werden in dem DVWK-Merkblatt, Heft 114 [1] beschrieben und vor dem Hintergrund ihrer Vor- und Nachteile bewertet. Im vorliegenden Bericht wird lediglich auf die Geräte eingegangen, die sich im Rahmen der Grundwasserüberwachung bewährt und seit mehr als 50 Jahren in Baden-Württemberg erfolgreich eingesetzt werden: das Lysimeter nach Friedrich-Franzen (sogenanntes Standardlysimeter) und das wägbare Lysimeter. Die Merkmale der Lysimeteranlagen im Landesmessnetz sind in Tabelle 3.1-1 zusammengestellt.

Tabelle 3.1-1: Eigenschaften der Lysimeter im Landesmessnetz

Eigenschaften	Lysimeter nach Friedrich-Franzen	Wägbares Lysimeter ohne Grundwasser (1 Anlage)
Größe	Kleinlysimeter mit 1 m ² Auffangfläche	3,14 m ² Auffangfläche
Einbringungsart des Bodens	ungestört (monolithisch) teilweise gestört (eingefüllt)	gestört (schichtweise eingefüllt)
Einbautiefe	unter Flur (ca. 50 cm) teilweise ebenerdig	
Wägbarkeit	nein	ja
Vorhandensein von Grundwasser	unerwünscht	nicht zulässig
Bewuchs	Grünland (Regelfall) Ackerfläche, Streuobstwiese	Grünland

3.2 Das Standardlysimeter nach Friedrich-Franzen

Für die möglichst umfangreiche Bestimmung der Wasserhaushaltsgrößen sollen eindeutig wägbare Lysimeter bevorzugt werden. Es handelt sich dabei aufgrund des erforderlichen hohen technischen Aufwands um vergleichsweise teure und wartungsintensive Versuchseinrichtungen. Wenn es bei den Untersuchungszielen primär um die Abschätzung der lokalen Neubildungsraten geht, werden im Regelfall einfache (nicht wägbare) Lysimeter bevorzugt.

Das Lysimeter nach Friedrich-Franzen ist der am häufigsten eingesetzte Lysimetertyp in der Bundesrepublik Deutschland [6]. Es besteht aus einem zylinderförmigen, rd. 1,50 m hohen Auffanggefäß aus ca. 6 mm dickem feuerverzinktem Stahlblech mit 1,13 cm Innendurchmesser, entsprechend 1 m² Auffangfläche (Abbildung 3.2-1).

Dabei handelt es sich um ein sogenanntes grundwasserfreies Lysimeter, d. h. es muss vollständig in der ungesättigten Bodenzone eingebaut werden. Der Lysimeterbehälter soll dabei sowohl Teile der Wurzelzone als auch des unbeeinflussten, nicht durchwurzelten Bodens umfassen. Die Unterkante des Lysimeters muss sich oberhalb des Kapillaraufstiegsaums befinden, um den direkten Kontakt der Pflanzen mit dem Kapillarwasser und demzufolge eine erhöhte Verdunstung zu verhindern. Diese Messeinrichtung eignet sich insbesondere für leichte und flachgründige Böden unter einer flach wurzelnden Vegetation (z. B. Gras). Der Einsatz ist in bindigen und tiefgründigen Böden grundsätzlich möglich, wobei auf eine ausreichende Behälterlänge und einen ausreichenden Grundwasserflurabstand zu achten ist.

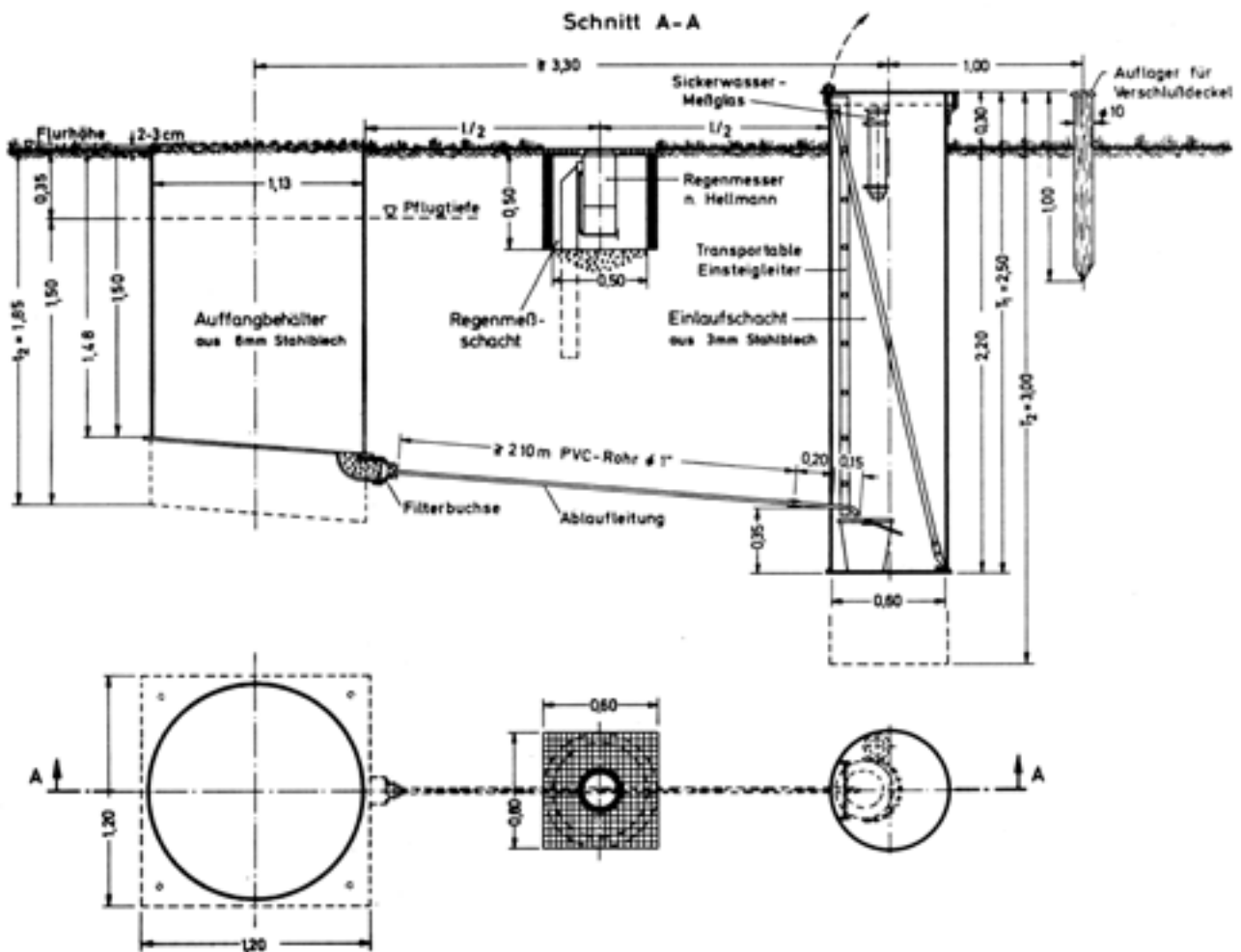


Abbildung 3.2-1: Ausbauezeichnung eines Lysimeters nach Friedrich-Franzen für einen Grünlandstandort (gestrichelt für einen Ackerstandort) (aus [1])

Der Bodenkörper im Lysimeterbehälter kann schichtweise (gestört) oder als Monolith (ungestört) eingebracht werden. Bei letzterer Variante wird der zylindrische Stahlbehälter in den Bodenbereich gerammt bzw. gestochen und anschließend freigelegt, um die Bodenplatte darunter zu schieben und eine Ablaufleitung an seiner Unterkante anzuschweißen (Abbildung 3.2-2). Die fertige Anlage besteht neben diesem Lysimeterbehälter auch aus einem Kontrollschacht und einem Regenmesser. Nachdem das Sickerwasser die Unterkante des Auffangbehälters erreicht hat, fließt es über ein Ablaufrohr in den im Kontrollschacht befindlichen Eimer. Weitere einbautechnische Einzelheiten und Konstruktionsmaße können dem DVWK-Merkblatt [1] entnommen werden.



Abbildung 3.2-2: Einbau des Lysimeters Durmersheim (Monolith, GW-Nr. 0503/210-4) am 23. April 1968. Bild: unbekannt

Lysimeter nach Friedrich-Franzen können als Monolith in allen Lockerböden über dem zu erwartenden Höchstgrundwasserstand gestochen werden, sofern keine größeren Steine ihren ordnungsgemäßen Einbau verhindern. Bei gestörten Bodenverhältnissen wird der Bodenkörper schichtweise in den Lysimeterbehälter eingefüllt und verdichtet, wobei der Ausgangszustand des Naturbodens möglichst nachgebildet werden soll. Unter Ackerland ist die Oberkante des Lysimeterbehälters deutlich unterhalb der zu erwartenden Pflugtiefe (etwa 50 cm) zu setzen, um die Feldarbeiten nicht zu beeinträchtigen (Abbildungen 3.2-2 und 3.2-3). Bei Grünland empfiehlt sich demgegenüber ein bodenebener Einbau, wobei der Behälterrand bis zu 2 cm aus der Geländeoberfläche herausragen kann, damit eine Überwachung der Zu- und Abflüsse im Bereich der Auffangfläche besser möglich ist. In fertig gestellten Lysimeteranlagen sind meist lediglich Kontrollschacht und

Regenmesser sichtbar (Abbildungen 2.1-1 und 2.1-2).

Das Standardlysimeter nach Friedrich-Franzen erfüllt die notwendigen Kriterien zur Ermittlung der Sickerwassermenge, ohne mit den groben Messfehlern von Kleinstlysimetern behaftet zu sein. Insbesondere verringern sich durch die größere Auffangfläche die Randeffekte, Stauwasser, welches zu einer erhöhten Verdunstung führt, wird vermieden und es entwickelt sich ein nahezu „normales“ Pflanzenwachstum an der Erdoberfläche. Bei den bis zur Geländeoberkante anstehenden Anlagen ist jedoch – im Vergleich zur Vegetation in der Umgebung – meist ein unterschiedlicher Bewuchs zu beobachten. Diese Beobachtung wurde von der LUBW bis dato allerdings nicht systematisch untersucht und dokumentiert.



Abbildung 3.2-3: Lysimeterbehälter der Anlage Elgersweiler (GW-Nr. 0500/115-4) unter einer Streuobstwiese. Die Latte steht auf der Behälteroberkante. Die Einbautiefe betrug bis 1987 rd. 60 cm unter Flur.

Lysimeter nach Friedrich-Franzen sind zur Untersuchung der Sickerwasserbeschaffenheit nur eingeschränkt einsetzbar, da Ausbaumaterialien und -formen dazu nicht geeignet sind.

3.3 Das wägbare Lysimeter (Station Büchig)

In Baden-Württemberg wird ein einziges wägbares Lysimeter betrieben (Abbildungen 3.3-1 bis 3.3-3). Die Lysimeteranlage Büchig wurde 1977 als Lysimeterstation zur Untersuchung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag geplant und 1978 in Betrieb genommen. In den 1980er Jahren gab es Überlegungen, die Station auch für die Untersuchung der Sickerwasserbeschaffenheit zu verwenden. Die baulichen Randbedingungen der Station waren jedoch für die zufriedenstellende Durchführung derartiger Untersuchungen ungünstig.

Ende 1991 musste die Niederschlagsbeschaffenheitsmessstation, die auf dem Dach des LUBW-Hauptgebäudes in Karlsruhe aufgestellt war, verlegt werden. Es bot sich damals an, diese Station am Lysimeterstandort in Büchig aufzubauen und die dort verfügbare Fläche zu nutzen und überdies zusätzliche Gerätschaften für die Intensivierung der Wetterbeobachtung einzurichten. Es stehen derzeit folgende Messmöglichkeiten zur Verfügung:

- Sickerwassermenge am wägbaren Lysimeter,
- Sickerwassermengen an 5 Standardlysimetern nach Friedrich-Franzen, die unter unterschiedlichen Verhältnissen eingebaut wurden,
- Niederschläge an 2 Regenmessern (in Bodenhöhe und 1 m über Gelände),
- Grundwasserstand,

- Grundwassertemperatur,
- Lufttemperatur (in Bodenhöhe und 2 m über Gelände),
- Luftfeuchte,
- Luftdruck,
- Windgeschwindigkeit (4 m über Gelände),
- Globalstrahlung.

Die Messwerte werden stündlich erfasst, in einem Datenlogger abgespeichert und täglich zur Messnetzzentrale der LUBW übertragen. Die meteorologischen Messungen finden Eingang in verschiedene Berechnungsmethoden der Grundwasserneubildung aus Niederschlägen und ermöglichen daher den unmittelbaren Vergleich zwischen gemessenen Sickerwassermengen und berechneten Ergebnissen am Standort Büchig.

Der Lysimeterstandort Büchig am nordöstlichen Rand der Stadt Karlsruhe ist keinen unmittelbaren Emissionsquellen ausgesetzt. Im Westen erstreckt sich ein ausgedehntes Waldgebiet und im Norden eine lockere Bebauung. In den übrigen Richtungen dominieren landwirtschaftlich genutzte Flächen. Eine Hauptstrecke der Deutschen Bahn verläuft unmittelbar westlich der Station, die durch hohe Hecken gegen den Wind geschützt wird. Ein kleiner Waldbestand grenzt östlich an, wobei der Mindestabstand zu den Messeinrichtungen nach jahrzehntelangem Wachstum kaum noch eingehalten wird.



Abbildung 3.3-1: Wägbares Lysimeter Büchig (Außenansichten).

Kernstück der Anlage ist das wägbare Lysimeter, das aus einem mit Boden gefüllten Glasfaserbehälter besteht. Das Sickerwasser wird über eine an der Sohle angebrachten Ableitung in ein Messgefäß geführt. Im Gegensatz zu nicht wägbaren Lysimetern ist der Auffangbehälter hier nicht fest in die Erde eingebaut, sondern steht freibeweglich auf einer Waage (Abbildung 3.3-2). Die synchrone Erfassung von Niederschlag, abfließendem Sickerwasser und Gewichtsänderung ermöglicht die Abschätzung der Bodenwasserhaushaltsänderungen im Lysimeterbehälter und der Gesamtverdunstung gemäß Gleichung [3].



Abbildung 3.3-2: Wiegeeinrichtung des wägbaren Lysimeters Büchig (1 von 3 Druckmessdosen).



Abbildung 3.3-3: Wägbares Lysimeter Büchig (Innenansicht).

Der Lysimeterbehälter ist mit einem Durchmesser von 2 m (dies ergibt eine Auffangfläche von 3,14 m²) und einer Höhe von 2,50 m deutlich größer als bei Standardlysimetern. Mit Boden gefüllt wiegt der Behälter rund 15 Tonnen. Drei elektronische Druckmessdosen erlauben eine Wiegegenauigkeit von 200 Gramm, das entspricht einer Messgenauigkeit von mehr als einem zehntel Millimeter Niederschlag und/oder Verdunstung pro Quadratmeter. Um systematische Messfehler beim Lysimetergewicht zu vermeiden, wird die Wiegevorrichtung in regelmäßigen Abständen kalibriert. Im Übrigen werden die Zeitpunkte des Mähens der Oberfläche mit Abtragen des Mähguts in das Beobachterprotokoll vermerkt. Das tatsächliche Gewicht des Mähguts und die atmosphärische Deposition werden nicht erfasst. Die beiden zuletzt genannten Größen gleichen sich teilweise aus und sind vor dem Hintergrund der jährlichen Gewichtsschwankungen des Lysimeters (im Mittel etwa 400 kg) vernachlässigbar.

Lysimetergewicht und Sickerwassermenge (Kippwaagen) werden halbstündlich registriert.

Da das Lysimetergefäß frei zugänglich ist, können bei Bedarf unterschiedliche Messgeräte in dafür vorgesehene Öffnungen an der Glasfaserhülle des Bodenkörpers eingebaut werden, beispielsweise Tensiometer oder Saugkerzen. Damit können auch chemische Untersuchungen des durch den Boden sickernden Wassers in unterschiedlichen Tiefenhorizonten durchgeführt werden.

Im Kapitel 6 wird auf die seit 1978 gewonnenen Erfahrungen und Messergebnisse der Station Büchig näher eingegangen.

4 Das Lysimetermessnetz

4.1 Messnetzziele

Eine zumindest stichprobenartige Überwachung von Niederschlag und Sickerwasser kann frühzeitig Hinweise auf mögliche Veränderungen von Menge und Beschaffenheit des Grundwassers geben. Unter dieser Prämisse stellen Lysimeter in Kombination mit einfachen Niederschlagssammlern bedeutende Messeinrichtungen für das Sickerwasser in Lockergesteinsaquiferen dar. Die in Baden-Württemberg durchgeführten Lysimetermessungen erfolgen punktuell nach gewässerkundlichen Gesichtspunkten mit dem Ziel, wasserwirtschaftliche Hintergrund- und Vergleichsdaten zu gewinnen.

Lysimeterdaten finden darüber hinaus Eingang in die Zeitreihen- und Stichtagsauswertungen der Hydrogeologischen Kartierungen und in die regionalen Grundwassermodelle der LUBW. Daneben werden sie im Rahmen unterschiedlichster Datenauskünfte, Auswertungen, Stellungnahmen und Gutachten genutzt, die seitens der LUBW für die Wasserwirtschaftsverwaltung und Dritte zu erstellen sind.

Die allgemeinen Ziele der Überwachung von Eintragsgrößen in das Grundwasser können für Sickerwasser und Niederschlag wie folgt spezifiziert werden:

- beispielhafte Erfassung der Sickerwasserbeschaffenheit als Eintrag in das Grundwasser in Abhängigkeit von Klima, Landnutzung, Landbewirtschaftung und Bodenart.
- Frühindikation von Veränderungen der Grundwassermenge und der Grundwasserbeschaffenheit im Lockergestein,
- direkte Messung der Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag als Stützstelle für Neubildungsberechnungen und Eingabedatum für regionale Grundwassermodelle,
- direkte Messung der Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag als Vergleichsgröße für Verfahren zur regionalen Berechnung von Sickerwassermengen bzw. der Grundwasserneubildung aus Niederschlägen (z. B. GWN-BW),

Die Lysimeter wurden hauptsächlich für die Erfassung der Sickerwassermenge bzw. die Gewinnung von Neubildungsdaten eingerichtet und eignen sich nicht für die Überwachung der Sickerwasserbeschaffenheit. Im Festgesteinsbereich sind andere Verfahren und Messeinrichtungen erforderlich.

Lysimeterdaten sollen für Fragestellungen zum Klimawandel im Hinblick auf die zu erwartenden Veränderung des Neubildungsgeschehens herangezogen werden. Überlegungen und Ausarbeitungen stehen noch am Anfang, wobei die Aussichten – zumindest mit den Messstellen aus dem Landesmessnetz – unklar sind. Die Klimasignale sind in der Tat sehr schwach ausgeprägt und daher nur bedingt von möglichen weiteren altersbedingten und sonstigen Drifterscheinungen bei der Sickerung zu unterscheiden bzw. heraus zu filtern. Auch die Exposition des begleitenden Niederschlagsmessgeräts kann sich im Laufe der Jahre allmählich verändern, beispielsweise infolge von Vegetationswachstum, was zu einer Drifterscheinung, die einem Klimasignal verwechselnd ähnlich sehen kann, führen kann.

4.2 Messnetzumfang

Das Lysimetermessnetz wird seit 1963 betrieben. In Zeiten seiner maximalen Ausdehnung im Jahr 1982 umfasste es bis zu 132 Messstellen an 51 Standorten in den wesentlichen Lockergesteinsbereichen des Iller-Riß-Gebiets, des Singener Beckens und insbesondere des Oberrheingraben (Abbildung 4.2-1). Das Messstellenkontingent ist seitdem rückläufig. Das Messnetz wurde in den Jahren 1996/97 überprüft und auf insgesamt 65 Messstellen an 35 Standorten reduziert (Abbildung 4.2-2). Gründe für die Anlagenstilllegungen waren neben Einsparungsmaßnahmen überwiegend technische Defekte, die im Laufe der

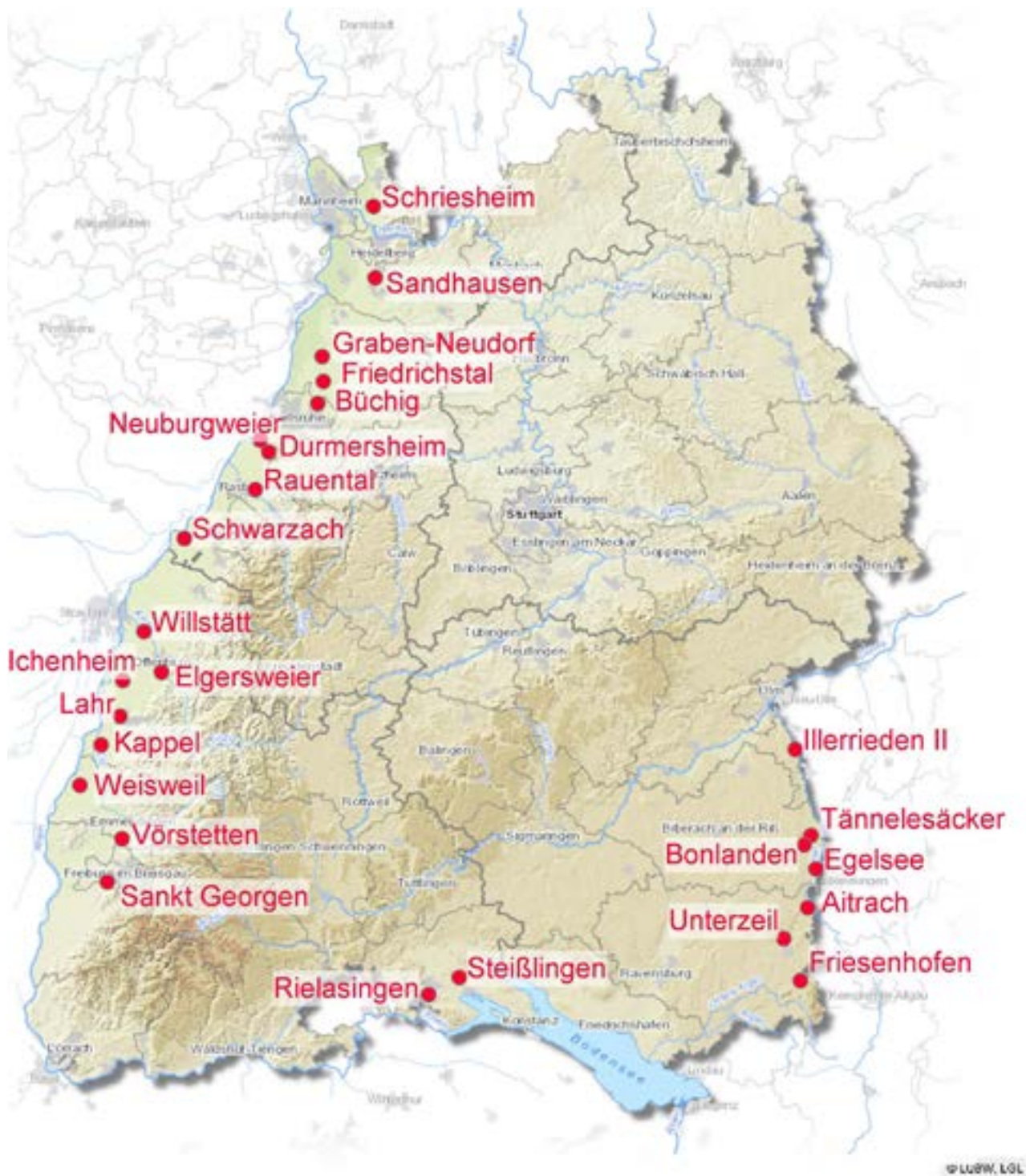


Abbildung 4.2-1: Lysimetermessnetz Baden-Württemberg (Stand: 2018)

Betriebszeit allmählich zu auffälligen bzw. unplausiblen Sickerwassermessungen geführt hatten (siehe Kapitel 5). Im Berichtsjahr 2018 sind noch 26 Lysimeteranlagen in Betrieb bestehend aus insgesamt 32 einzelnen Lysimetertöpfen und 26 Niederschlagsstationen.

Da Lysimeter vornehmlich in Lockergesteinen einsetzbar sind, wären neue Standorte allenfalls in Flusstälern, die die Festgesteinsgebiete linienhaft durchschneiden und mit flu-

viatilen Schottern und Sanden verfüllt sind, denkbar. Diese Lysimeter würden jedoch nur kleinste Flächen repräsentieren, da sich die Morphologie, die Bodenstruktur und das Klima entlang eines Flusses fortwährend ändern. Weitere Punkte, die gegen den Einsatz von Lysimetern in solchen Gebieten sprechen, sind einerseits die starke Reliefausbildung, da ab einer gewissen Geländeneigung der Oberflächenabfluss nicht mehr vernachlässigt werden kann, und andererseits die verfügbare Bodenschicht, die vielerorts –

beispielsweise im Jura der Schwäbischen Alb – für den Lysimeter Einsatz zu geringmächtig ist. In diesen Gebieten sowie in den übrigen Festgesteinsgebieten wird die Grundwasserneubildung über Abflussdaten von Vorflutern oder besser durch Berechnungen im Rahmen des im Lande eingesetzten Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW ermittelt.

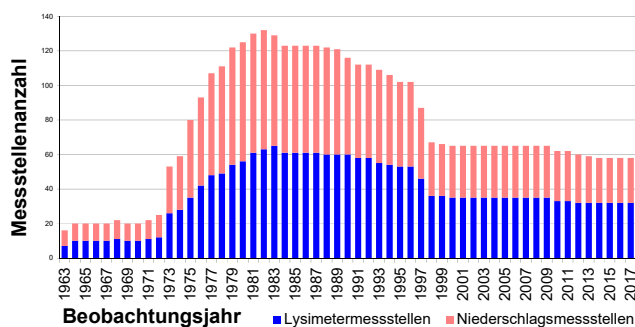


Abbildung 4.2-2: Entwicklung der Anzahl an Lysimetermessstellen und Niederschlagsmessstellen im Zeitraum 1963 – 2017

Eine Erweiterung des Messnetzes ist zurzeit aus fachlichen Erwägungen und aus Ressourcengründen nicht vorgesehen.

4.3 Messnetzbetrieb und Beobachteranweisungen

4.3.1 Organisation und Aufgaben

Das Umweltministerium regelt die Zusammenarbeit und Aufgabenverteilung im Gewässerkundlichen Messnetz (Messwesen und Monitoring) des Landes.

Demnach obliegen den Regierungspräsidien beim quantitativen Landesmessnetz der allgemeine Betrieb sowie die bauliche und gerätemäßige Unterhaltung der Messstellen. Sie bestellen die Beobachter, weisen sie ein und überwachen deren Tätigkeit. Die Regierungspräsidien veranlassen die notwendigen Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten, soweit sie diese nicht selbst durchführen.

Der beauftragte Beobachter hat die Messstelle in einem festgelegten messstellenscharfen Turnus aufzusuchen. Die Messung erfolgt täglich bis mehrmals wöchentlich. In Ausnahmefällen, z.B. bei sehr starken oder lang andauernden Niederschlägen bzw. wenn zu befürchten ist, dass der Mess-eimer im Einlaufschacht überlaufen könnte, muss die Messstelle auch zwischen den regelmäßigen Beobachtungen abgelesen werden. Lysimetermessstellen erfordern ver-

gleichsweise zu anderen Grundwassermengensmessstellen wie Quellen oder Beobachtungsrohren häufige Ortsbesuche.

4.3.2 Bedienung der Niederschlagsmessstelle

Die Niederschlagsmenge wird standardmäßig mit dem Regenschirm nach Hellmann gemessen. Der Raum über der Niederschlagsmessstelle muss in einem Einfallswinkel von 45° frei sein von Bäumen oder Gebäuden. Ist dies nicht (mehr) der Fall, ist das zuständige Regierungspräsidium zu verständigen. Im Regelfall reicht das Zurückschneiden der heranwachsenden Vegetation aus, um ordnungsgemäße Standorteigenschaften wieder herzustellen. Die Einrichtung eines Alternativstandorts als ein Kompromiss zwischen der Einhaltung von vertretbaren Randbedingungen und der unmittelbaren Nähe zum Lysimetertopf wird in der Praxis nur in Ausnahmefällen vorgenommen.

Der Inhalt der Sammelkanne wird in das zur Niederschlagsmessstelle gehörende Messglas, das nach Millimeter (Niederschlag) geeicht ist, entleert und das Ergebnis mit einer Nachkommastelle genau, z.B. 8,4 mm, in das Lysimeterformular (Monatsliste) in die Spalte "Niederschlag" eingetragen (siehe Anlage 2). Da das Volumen der Sammelkanne um ein Mehrfaches größer ist als das des Messglases, ist besonders sorgfältig vorzugehen, wenn viel Regen gefallen ist. Das Messglas ist dann entsprechend oft bis zur Marke 10,0 mm aus der Sammelkanne aufzufüllen, die Restmenge festzustellen und das Ergebnis (z.B. 10,0 mm + 10,0 mm + 4,3 mm = 24,3 mm) in das Lysimeterformular einzutragen. Das gemessene Wasser ist wegzuschütten, aber weder auf den Auffangbehälter des Lysimeters noch in den Einlaufschacht.

Ist Schnee gefallen, ist die Sammelkanne mit dem Schnee gegen eine leere Sammelkanne, die zu jeder Niederschlagsmessstelle gehört und stets bereitgehalten werden muss, auszutauschen. Die mit Schnee gefüllte Sammelkanne wird in einen warmen Raum gebracht, aber nicht auf einen Heizkörper gestellt. Sobald der Schnee geschmolzen ist, wird der Inhalt auf die schon beschriebene Weise gemessen. In die Spalte „Niederschlag“ des Lysimeterformulars ist der gemessene Wert und in die Spalte „Beeinflussung zum Niederschlag“ der Wert „S“ einzutragen. Es wäre falsch, das Ergebnis in die Spalte „Schneedecke“ einzu-

schreiben. In diese Spalte wird die Höhe der Schneedecke in cm, welche über dem Auffangbehälter des Lysimeters mit dem Meterstab gemessen wird, eingetragen.

4.3.3 Bedienung des Lysimeters

Nach der Bedienung der Niederschlagsmessstelle wird das Sickerwasser gemessen. Aus dem Einlaufschacht wird der Messeimer vorsichtig hochgezogen und sein Inhalt an der Skala grob abgelesen (z.B. 4,5 l). Zur genauen Bestimmung der Menge des Sickerwassers füllt der Beobachter den hierfür vorgesehenen Messzylinder, der auf $1000 \text{ cm}^3 = 1 \text{ Liter}$ geeicht ist, so oft bis zur Marke 1000 cm^3 , bis die vollen Literzahlen gemessen sind (evtl. zu viel eingefülltes Wasser in den Messzylinder ist wieder in den Messeimer zurück zu gießen). Die Restwassermenge ist ebenfalls mit Hilfe des Messzylinders auf 10 cm^3 genau zu bestimmen. Die Einzelergebnisse sind dann zu addieren und in die Spalte „Sickerwasser“ des Lysimeterformulars (siehe Anlage 2) einzutragen. Ist kein Sickerwasser vorhanden oder ist es nicht messbar (z.B. nur einige Tropfen), so ist eine Null – 0.0 – in das Lysimeterformular einzutragen.

Als Alternative zu dieser – insbesondere bei hohem Wasservolumen umfangreichen und fehleranfälligen – Messmethode kann ebenfalls das Wassergewicht in [kg] mittels einer Haushaltswaage bzw. jeder anderen Wiegevorrichtung mit einer Messgenauigkeit von mindestens 10 g bestimmt werden. 1 Kilogramm entspricht dabei 1 Liter Wasser bei Vernachlässigung des Einflusses der temperaturabhängigen Wasserdichte. Das Eigengewicht des Behältnisses (Tara) muss allerdings vom Gesamtgewicht aus Sickerwasser und Gefäß abgezogen werden.

Die Höhe der Schneedecke und die Höhe des Bodenbewuchs werden über dem Auffangbehälter mit dem Meterstab in cm gemessen und in die Spalten „Schneedecke“ bzw. „Bodenbewuchs“ des Lysimeterformulars eingetragen.

Die Messung der Schneehöhe ist bei jedem Messtermin, wenn Schnee liegt, vorzunehmen. Dies gilt unabhängig davon, ob seit der vorhergegangenen Messung der alte Schnee weggetaut und neuer Schnee gefallen ist, zum alten Schnee neuer Schnee hinzugekommen ist oder nur alter Schnee liegt.

Die Höhe des Bodenbewuchs soll monatlich mindestens einmal zentimetergenau angegeben werden.

Da der Messeimer im Einlaufschacht nur 15 l Sickerwasser fassen kann und bei länger andauerndem Regen mehr als 15 l Sickerwasser zwischen zwei aufeinander folgenden Messungen zu erwarten sind, muss bei solchen meteorologischen Bedingungen die Sammelkanne der Niederschlagsmessstelle und der Messeimer des Lysimeters auch noch zwischenzeitlich abgelesen werden. Dabei ist zu beachten, dass das Sickerwasser mit einer gewissen Verzögerung austritt. Die Sondermessungen an der Lysimeteranlage müssen daher auch noch einige Zeit nach Aufhören des Regens fortgesetzt werden.

4.3.4 Datendienst

Das vom Beobachter ausgefüllte Lysimeterformular ist im Regelfall jeweils nach der letzten Messung im Monat der LUBW zuzusenden. Die gesammelten Mess- und Beobachtungsbelege werden geprüft und für die Datenerfassung vorbereitet. Die LUBW erfasst und plausibilisiert die Daten abschließend. Sie sollen spätestens sechs Monate nach Abschluss des Messjahres im WIBAS-Modul „Grundwasserdatenbank“ (GWDB), dem zentralen Werkzeug für Grundwasserdatenverarbeitung in der Wasserwirtschaftsverwaltung Baden-Württembergs, bereitgestellt werden.

Im Wesentlichen unterstützt die GWDB folgende Aufgaben:

- Stammdatenerfassung, Pflege und Auswertung (Messstellenbeschreibungen),
- Messwerterfassung, Pflege und Auswertung (physikalische und chemische Messwerte, Probennahmedaten, Grundwasserstände, Quellschüttungen, Lysimeterdaten, Entnahmemengen),
- Datenaustausch, flexible Export- und Importschnittstellen,
- grafische Darstellungen und GIS-Funktionalitäten,
- standardisierte Berichterstattungen und Datenauswertungen,
- modulübergreifende Zuordnungen von Grundwassermessstellen zu anderen Objekten (Wasserschutzgebiete, Kläranlagen, Altlasten, Erdwärmesonden usw.).

5 Erfahrungen und Erkenntnisse

5.1 Zum Lysimeter nach Friedrich-Franzen

Lysimetermessungen werden zur Beschreibung von natürlichen Prozessen unter möglichst naturbelassenen Verhältnissen verwendet. Bereits beim Einbau des Lysimetergefäßes wird aber ein Eingriff auf die natürliche Wasserbewegung vorgenommen. Die ordnungsgemäße und vorsichtige Einrichtung eines Lysimeters nach Friedrich-Franzen trägt in der Tat zur Verminderung der Störfaktoren während des anschließenden Messbetriebs bei, wird diese jedoch nie vollständig ausschalten können.

Die meisten Fehlerquellen wurden im Rahmen von Laborversuchen erforscht. Wesentliche Fehlerquellen aus der Fachliteratur, die im Zuge des vieljährigen Messnetzbetriebs nicht eindeutig nachgewiesen werden konnten, sind in Tabelle 5.1-1 zusammengestellt.

Die amtlichen Lysimeter Baden-Württembergs wurden nach den Regeln der Technik erbaut, wobei die bekannten Störfaktoren möglichst eingedämmt wurden. Eine minimale Einbautiefe der Unterkante des Lysimeterbehälters (in Tabelle 5.1-1 unter „Länge des Lysimeterbehälters“ erläutert) wurde in Abhängigkeit des Bodentyps festgelegt und eingehalten. Das Standardlysimeter nach Friedrich-Franzen wurde aufgrund seiner überwiegend positiven

Bewertung im DVWK-Regelwerk [1] ausgewählt. Offensichtliche konstruktionsbedingte Fehlerquellen konnten auch nach mehr als 50 Betriebsjahren nicht nachgewiesen werden.

5.2 Zum Messnetzbetrieb

5.2.1 Grundsätzliche Erkenntnisse

Die Erfahrungen der LUBW in Sachen Lysimeter beruhen auf einem mehr als fünfzigjährigen Messnetzbetrieb. Die im Kapitel 5.1 aufgeführten Fehlerquellen wurden im Zuge der Aufbauphase berücksichtigt und konnten durch den Einsatz des Standardlysimeters nach Friedrich-Franzen im Wesentlichen ausgeschaltet werden. Zwei Standorte wurden zu Testzwecken mit speziellen Lysimetertypen ausgestattet. Das Lysimeter nach Schendel und das Bohrlysimeter wurden jedoch bereits nach kurzer Einsatzdauer aufgrund des hohen Wartungsaufwands sowie unplausibler Messergebnisse wieder außer Betrieb genommen. Ebenso wurde auf den Einsatz der für die Sammlung von Niederschlägen über längere Zeiträume vorteilhaften Totalisatoren nach wenigen Einsatzjahren verzichtet, weil die dafür erforderliche Verwendung von Frostschutzmittel und Öl auf Wasserwerksgelände unerwünscht war. Lysimeter haben sich für die Sickerwassermessung prinzipiell bewährt mit dem

Tabelle 5.1-1: Baulich bedingte Fehlerquellen beim Lysimeter nach Friedrich-Franzen

Störfaktor	Beschreibung	Auswirkungen	Behebung
Länge des Lysimeterbehälters, Sickerwasserstau	Bei zu geringer Einbautiefe des Lysimetergefäßes werden kapillare Aufstiege begünstigt.	Bildung eines Wasserstaubereichs am Lysimeterboden mit Veränderung des kapillaren Aufstiegsverhaltens	Ist beim Einbau in Abhängigkeit des Bodentyps zu berücksichtigen
Oaseneffekt	Die Evapotranspiration der Lysimeter ist anders als in der Umgebung.	Verfälschung des Wasserhaushalts	Vergrößerung der Auffangfläche
Auffangfläche	Bewuchs und umfasster Bodenkörper weichen von der Umgebung ab.	Ausprägung von lokalen Unregelmäßigkeiten, Erscheinung von untypischem Fließverhalten	Einhaltung einer Mindestauffangfläche (1 m ²)
Randeffekte	Unterbrechung von unterirdischem seitlichem Pflanzenwachstum und Wasserfluss	Störung des natürlichen Wasserflusses, bevorzugte Versickerung in einer Dehnungsfuge entlang des Behälterrandes	Vergrößerung der Auffangfläche, Einbau unter Flur
Gestörter Boden	Künstliche Einfüllung des Bodens in den Lysimeterbehälter	Andere Verhältnisse, als im umliegenden Boden, die zu anderen Fließverhältnissen führen.	Ungestörter Einbau als Monolith

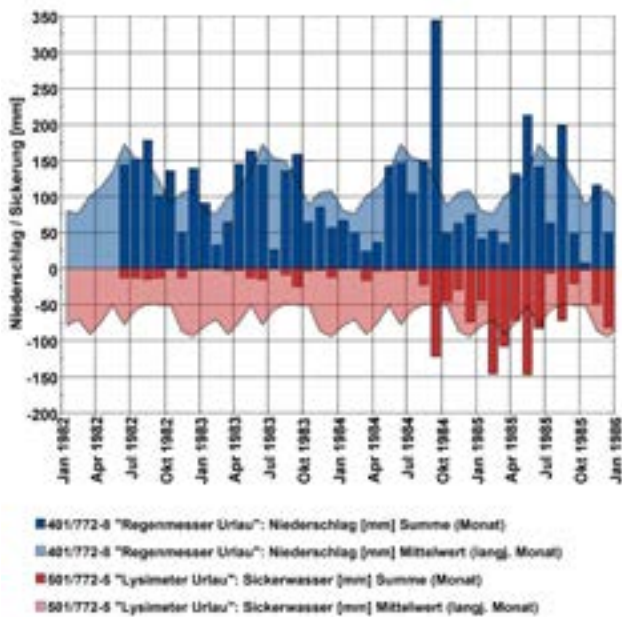


Abbildung 5.2-1: Geringfügige Sickerungen aufgrund von Wasserhaushaltsstörungen zu Beginn des Messbetriebs am Lysimeter Urlaub (Illertal)

Vorbehalt, dass keine Vergleichsuntersuchungen in der Umgebung der Anlagen unter natürlichen Bedingungen, also ohne Lysimetergefäß durchgeführt wurden. Prämisse dieses Messverfahrens ist, dass genau das Sickerwasser abgefangen und erfasst wird, das sich auf dem Weg in die Tiefe in Richtung Grundwasser befindet. Das jahreszeitliche Sickerverhalten und die Sickerarten erscheinen insgesamt plausibel, dokumentieren aber angesichts der zahlreichen Fehlerquellen lediglich Größenordnungen des tatsächlichen Versickerungsgeschehens. Bei der Nutzung von Lysimeterdaten für die Bestimmung der Grundwasserneubildung aus Niederschlägen muss die unterirdische Fließzeit vom Lysimeterboden bis zur Grundwasseroberfläche berücksichtigt werden.

5.2.2 Anlaufschwierigkeiten

Lysimeter liefern erst nach einigen Monaten bis wenigen Betriebsjahren verwertbare Daten. Der Anfangszeitpunkt von Auswertungen soll sich danach richten, ob der Wasserhaushaltszyklus des Bodens im Auffanggefäß wieder in Gang gesetzt wurde und den natürlichen Verhältnissen im Umfeld entspricht. Bei gestörten Bodeneinbauverhältnissen können bis zu zwei Beobachtungsjahre bis zu einer Normalisierung erforderlich sein. Bei Monolithen ist dieser Zeitraum in der Regel kürzer.

Derartige Anlaufschwierigkeiten gab es zum Beispiel am Lysimeter Urlaub, GW-Nr. 0501/772-5 (Abbildung 5.2-1). Dieser Effekt führt – wenn unbeachtet – zu einer systematischen Unterschätzung der Neubildung bei langjährigen Summen und Mittelwerten. Um diese mögliche Fehlerquelle dauerhaft zu eliminieren, wurden mit Ausnahme der inzwischen stillgelegten Anlage in Urlaub die Daten aus der frühen Beobachtungsphase von sämtlichen Lysimetern nicht in die Grundwasserdatenbank (GWDB) übernommen.

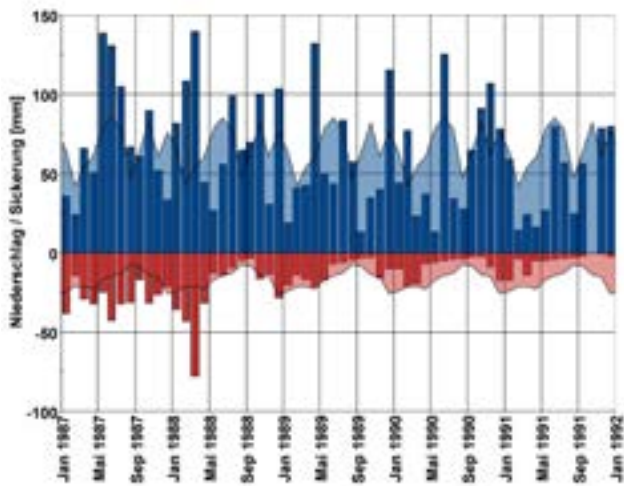
5.2.3 Drifterscheinungen

Lysimeter sind Messstellen, die sehr anfällig auf Veränderungen in und um den umschlossenen Bodenkörper sind. Bereits unscheinbare Ursachen können messbare Effekte auf das Versickerungsgeschehen zur Folge haben.

An wenigen Lysimetern wird über längere Zeiträume ein kontinuierlicher und signifikanter Rückgang der Sickerwassermenge beobachtet. Die Ursachen dafür sind zuweilen unklar, wobei Lysimeterstandorte unter Grünland ein insgesamt stabileres Verhalten aufweisen als unter Ackerland. Die zunehmende Bodenverdichtung im Zuge der Landwirtschaft ist in den meisten Fällen eine plausible Erklärung für diesen Effekt: das stählerne Lysimetergefäß verhindert die laterale Ausdehnung des umfassten Bodenkörpers mit der Konsequenz, dass intensiver landwirtschaftlicher Betrieb mit schweren Maschinen zur allmählichen Verdichtung des Bodens führt. Dieses Phänomen wird beispielsweise am Lysimeter Scheibenhardt ab etwa 1989 beobachtet, hier im Zuge des Baus einer Golfanlage (Abbildung 5.2-2). Die Messwerte im fragwürdigen Zeitfenster dürfen keinen Eingang in langjährige Auswertungen finden. Eine Standortsanierung, z.B. durch Auflockerung der Bodendeckschichten im Lysimeterbereich wäre in dieser Situation aussichtsreich gewesen.

Die Anlage in Scheibenhardt wurde zum Jahresende 1996 aufgrund ihrer problematischen Zugänglichkeit auf dem Anwesen stillgelegt.

Ebenerdig eingebaute Lysimetertöpfe, die bis an die Geländeoberkante reichen, sind Bodenverdichtungsmaßnahmen stärker ausgesetzt als Stationen unterflur.

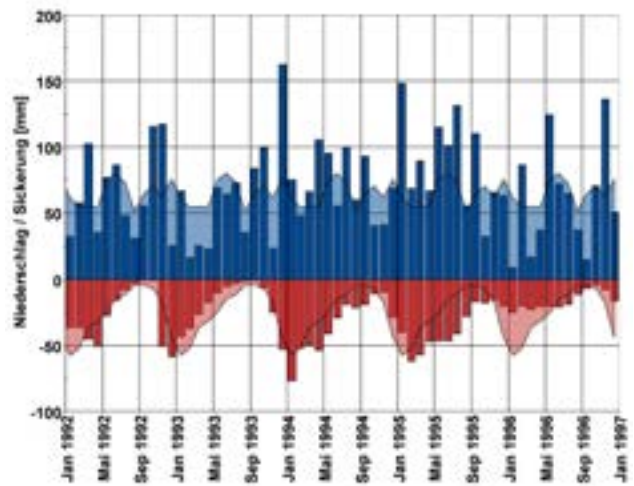


■ 400/260-0 "Regenmesser Scheibenhardt, KA": Niederschlag [mm] Summe (Monat)
 ■ 400/260-0 "Regenmesser Scheibenhardt, KA": Niederschlag [mm] Mittelwert (lang. Monat)
 ■ 500/260-4 "Lysimeter Scheibenhardt, KA": Sickerwasser [mm] Summe (Monat)
 ■ 500/260-4 "Lysimeter Scheibenhardt, KA": Sickerwasser [mm] Mittelwert (lang. Monat)

Abbildung 5.2-2: Auswirkungen einer zunehmenden Bodenverdichtung am Lysimeter Scheibenhardt (Rheintal)

Zunahmen der beobachteten Sickerwasserraten im Laufe der Zeit sind wesentlich seltener als Rückgänge. Die allmähliche Erhöhung der Durchlässigkeit ist nicht einfach erkennbar. Die Sickerung nimmt im Normalfall nicht linear mit den Niederschlägen zu, vielmehr werden ab einem bestimmten Bodenwassergehalt schlagartig ansteigende Versickerungsraten festgestellt. Das Vorhandensein von Makroporen, Trockenrissen, die je nach Jahreszeit mehr oder weniger stark ausgebildet sind, von Randeffekten oder schlicht von Mauselöchern, kann den natürlichen Versickerungsprozess überprägen, indem das Eindringen des Wassers in das Erdreich beschleunigt wird und dadurch die Sickerwasserraten zeitweise ansteigen. Anzeichen dafür sind insbesondere in den trockenen Sommermonaten erkennbar, wenn die Trockenrisse gut ausgebildet sind. Sommerniederschläge werden im Regelfall nämlich nahezu vollständig von der Vegetation aufgenommen bzw. verdunsten und leisten keinen nennenswerten Beitrag zur Neubildung. Lediglich Landregen oder rasch versickernde Niederschläge dringen unter sommerlichen Bedingungen in die tiefen Bodenschichten ein.

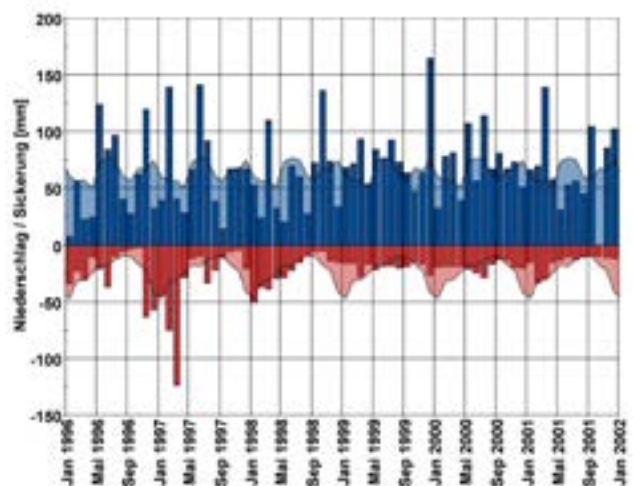
Der ebenerdig eingebaute Lysimeter Forchheim führte ab etwa 1994 in den Sommermonaten zunehmend Sickerwasser (Abbildung 5.2-3). Dieses Phänomen ließ sich weder durch die Niederschlagsdaten erklären noch durch den Vergleich mit den Beobachtungen an benachbarten Lysimeterstationen bestätigen. Im Zuge einer sommerlichen Ortsbegehung wurde festgestellt, dass als Ursachen weder



■ 400/210-2 "Regenmesser Forchheim": Niederschlag [mm] Summe (Monat)
 ■ 400/210-2 "Regenmesser Forchheim": Niederschlag [mm] Mittelwert (lang. Monat)
 ■ 500/210-0 "Lysimeter Forchheim": Sickerwasser [mm] Summe (Monat)
 ■ 500/210-0 "Lysimeter Forchheim": Sickerwasser [mm] Mittelwert (lang. Monat)

Abbildung 5.2-3: Auswirkungen von Trockenrissen am Lysimeter Forchheim (Rheintal)

eine veränderte Niederschlagsaufzeichnung (z.B. infolge einer Neuaufstellung des Regenmessers) noch Messfehler in Frage kommen. Sehr wahrscheinlich haben bis hin zur Geländeoberfläche sichtbare Trockenrisse im Bereich des bodeneben eingebauten Auffangbehälters die Veränderung des Bodenwasserhaushalts verursacht. Auf eine Sanierung der Anlage wurde verzichtet. Eine Weiterführung der historischen Messreihen war weder bei einer Instandsetzung noch mit einem Neubau der Anlage gewährleistet, da von einem veränderten Sickerungsgeschehen nach dem Eingriff auszugehen war.



■ 402/259-2 "Regenmesser BÜchig, Blankenloch": Niederschlag [mm] Summe (Monat)
 ■ 402/259-2 "Regenmesser BÜchig, Blankenloch": Niederschlag [mm] Mittelwert (lang. Monat)
 ■ 506/259-5 "Lysimeter V BÜchig, Blankenloch": Sickerwasser [mm] Summe (Monat)
 ■ 506/259-5 "Lysimeter V BÜchig, Blankenloch": Sickerwasser [mm] Mittelwert (lang. Monat)

Abbildung 5.2-4: Auswirkungen von Maulwurfaktivitäten (?) am Lysimeter BÜchig 5 (Rheintal)



Abbildung 5.2-5: Fest installierte Handpumpe am Lysimeter Bonlanden (GW-Nr. 0501/769-0, links) und batteriebetriebene Elektropumpe am Lysimeter Elgersweier (GW-Nr. 0500/115-4, rechts). Bilder: Regierungspräsidium Tübingen (links) und LUBW (rechts)

Eine ähnliche Entwicklung wurde am Lysimeter Büchig 5 ab etwa 1999 beobachtet (Abbildung 5.2-4). Die relativ gleichmäßige Versickerung in den Jahren 2000 bis 2005 konnten nicht abschließend erklärt werden, wobei Maulwurfaktivitäten im Lysimeterbereich möglicherweise den natürlichen Sickerungsprozess gestört haben. Die Messungen dokumentieren ab dem Jahr 2006 wieder typische jahreszeitliche Schwankungen. Vielleicht waren die unterirdischen Gangsysteme zum diesem Zeitpunkt wieder zusammengefallen.

5.2.4 Punktuelle Vorkommnisse

Übergelaufene Eimer sollen gemäß Beobachteranweisungen eigentlich nicht vorkommen, sind jedoch in Ausnahmesituationen wie bei Krankheit oder Urlaub des Beobachters schwer vermeidbar. Die Vorgehensweise beim Überlaufen des Eimers wird in Kapitel 4.3.2 beschrieben. Am Lysimeter Bonlanden wurde Abhilfe für dieses dort häufig auftretende Phänomen geschaffen, indem eine Handpumpe zum Absaugen der Überlaufmenge im Kontrollschacht fest installiert wurde (Abbildung 5.2-5). Bei einigen Lysimetern an Standorten mit geringen Flurabständen befinden sich Teile der Messeinrichtung permanent oder zeitweise im Grundwasser. Dieser grundsätzlich unerwünschte Zustand (siehe auch Kapitel 3.1) kann auf Dauer zu einer Durchrostung der Ablaufleitung und zu Leckagen an Lysimetertopf und Beobachtungsschacht führen. Das durch die Seitenwand des Messschachts eindringende Wasser unterscheidet sich vom Schwitzwasser und wird bei der Sickerwassermessung nicht berücksichtigt, solange der Messeimer nicht überläuft. Kleinere Leckagen am Lysimetertopf, beispielsweise im Bereich der Filterbuchse (siehe

Abbildung 3.2-1) sind demgegenüber schwer erkennbar, zumal hohe Grundwasserstände und starke Sickerungen meist zur selben Zeit stattfinden.

Am Lysimeter Elgersweier hatte eine undichte Stelle an der Bodenplatte des Beobachtungsschachts erhebliche Wasserzutritte zur Folge (Abbildung 5.2-5). Die Sickerwassermessung wurde durch das Aufschwimmen und Kippen des Messeimers zeitweise stark beeinträchtigt. Der Kontrollschacht wurde ausgebaut und rundum erneuert. Die Zulaufleitung wurde bei dieser Gelegenheit neu angeschweißt. Die Wasserzutritte wurden dadurch bis auf weiteres abgestellt.

Bislang wurde lediglich in zwei Situationen bei extrem hohen Grundwasserständen das Eindringen von Grundwasser in den Auffangbehälter durch Überlaufen beobachtet (Lysimeter Neuburgweier außen, GW-Nr. 0502/210-0, im Mai 1983 und Lysimeter Elgersweier, GW-Nr. 0500/115-4 im Jahr 1987). Dieses Problem wurde in Elgersweier durch das Anschweißen eines Aufsatzrings auf den Lysimetertopf behoben.

5.2.5 Unsicherheiten der Niederschlagsmessung

Die Niederschlagsmessung setzt im Gegensatz zur Lysimetrie eine gängige und weit verbreitete Messtechnik ein. Die LUBW nutzt Standardmessgeräte nach Hellmann unter möglichst DWD-konformen Randbedingungen (siehe Kapitel 2.3). An einigen Standorten wurden in der Vergangenheit zu Vergleichszwecken zusätzlich bodenebene Niederschlagssammler eingesetzt. Die in der Fachliteratur übliche Aussage, dass die in Bodenhöhe gemessene Niederschlags-

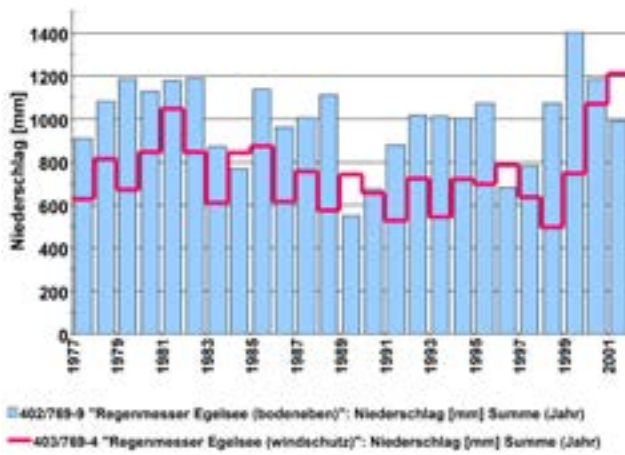


Abbildung 5.2-6: Vergleich der jährlichen Niederschlagsmengen auf Bodenebene und über Flur am Standort Egelsee

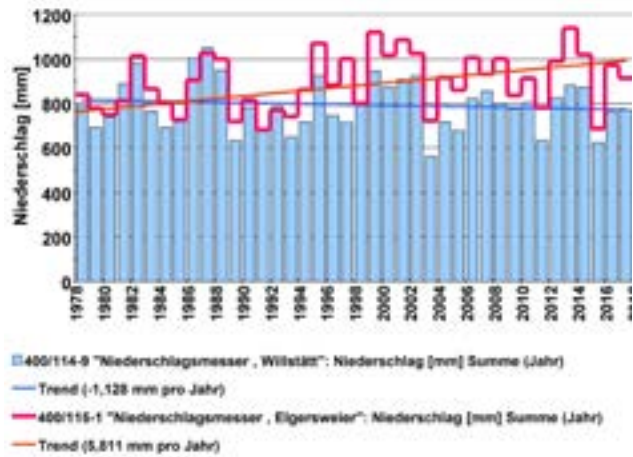


Abbildung 5.2-7: Beeinflussung der Niederschlagsmessung im Regenschatten von Bäumen im Raum Offenburg

menge größer ist als in 1 m über Flur, wird durch punktuelle Vergleichsmessungen an diesen Lysimeterstandorten bestätigt. Im Bereich der Lysimeteranlage Egelsee wurden beispielsweise starke Abweichungen von 25% im Zeitraum 1977/2000 trotz des Einbaus einer Windschutzvorrichtung am Überflurtopf beobachtet (Abbildungen 2.3-1 und 5.2-6). Trotz dieser Unterschätzung der realen Niederschlagsmengen wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit mit Regenmessern Dritter beschlossen, die eingesetzten Regenmesser möglichst nach den Vorgaben des Deutschen Wetterdienstes aufzustellen.

Zum Zeitpunkt der Installation sind die erforderlichen Randbedingungen üblicherweise erfüllt. Durch regelmäßige Zustandskontrollen wird sichergestellt, dass keine nachteiligen Veränderungen an der Messstelle selbst oder in ihrer Umgebung eingetreten sind. Es ist beispielsweise zu prüfen, ob der Niederschlagstopf nach wie vor waagrecht aufgestellt ist. Das Pflanzenwachstum führt häufig dazu, dass der erforderliche freie Einfallswinkel von 45° nach einigen Jahren nicht mehr eingehalten wird. Am Beispiel des durch heranwachsende Laubbäume zunehmend beschatteten Regenmessers Willstät wird die allmähliche Veränderung der Messwerte im Vergleich zum benachbarten Standort Elgersweiler veranschaulicht (Abbildung 5.2-7). Auch schnellwüchsige Strauchhecken stellen gravierende Beeinträchtigungen für die Messung von Niederschlag und Sickerwasser dar. Die Vegetation ist in diesen Fällen wenn möglich auf ein ausreichendes Maß zurück zu schneiden. Am erwähnten Standort Willstät wurden leider jegliche Forstarbeiten vom Grundstückseigentümer untersagt.

5.2.6 Hauptnutzung: Dauergrünland

Die bevorzugte Unterbringung der Lysimeterstationen des Landes auf Wasserwerksgeländen hat sich bewährt. Die Anlagen – insbesondere der freistehende Regenmesser – sind somit gegen unerwünschte äußere Eingriffe und Vandalismus besser geschützt und es lässt sich im Regelfall eine fachmännische Betreuung und Beobachtung durch die Wassermeister einrichten. Meistens wurde der Lysimeterbehälter innerhalb des eingezäunten Wasserwerksgeländes unter Dauergrünland eingebaut. Diese kontrollierten Landnutzungsbedingungen erleichtern die Datenauswertung sowie die landesweiten Vergleichsbetrachtungen beträchtlich, führen jedoch zwangsläufig zu Kenntnisdefiziten bei der Untersuchung des Neubildungsgeschehens unter Ackerland mit unterschiedlichen Fruchtfolgen.

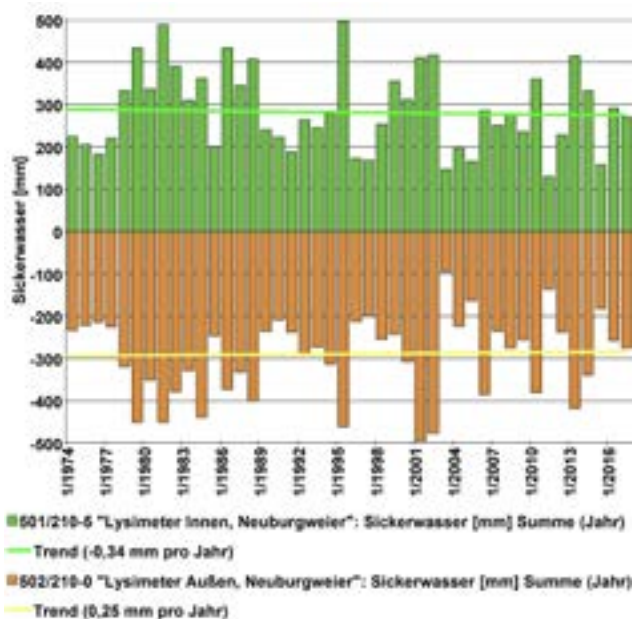


Abbildung 5.2-8: Vergleich der jährlichen Sickerungen am Standort Neuburgweiler unter Grünland (innen) und Ackerland (außen)

Am Lysimeter Neuburgweier im Rheintal südlich von Karlsruhe werden zwei Lysimetertöpfe parallel betrieben, wobei einer unter Ackerland außerhalb des Wasserwerksgeländes und der andere unter Dauergrünland innerhalb des Wasserwerksgeländes eingerichtet wurden. Wie aus Abbildung 5.2-8 hervorgeht, gibt es keine signifikant unterschiedlichen Sickeraten zwischen den beiden Messstellen; es kann allenfalls festgehalten werden, dass am Standort Neuburgweier etwas mehr Niederschlag unter Acker als unter Grünland versickert – die Differenz beträgt im langjährigen Mittel etwa 7 %. Inwieweit diese Beobachtung auf andere Lokalitäten übertragen werden kann oder ob es sich dabei um eine außergewöhnliche Erscheinung handelt, lässt sich mangels weiterer Vergleichsstandorte aus dem Lysimetermessnetz des Landes nicht näher präzisieren.

5.2.7 Rückspülung

Das Lysimeter Büchig 4 (GW-Nr. 0505/259-0) führte im Zeitraum von 2002 bis 2005 kein Sickerwasser und wurde daraufhin durch eine Rückspülungsmaßnahme saniert. Im Zuge dieser Maßnahme wurde Wasser unter niedrigem Druck, um die unterirdischen Leitungen und Muffen nicht zu beschädigen, in das Austrittsrohr im Kontrollschacht bis zum Überlaufen des ebenerdig eingebauten Lysimetertopfs eingeführt. Das eingebrachte Wasservolumen wurde dokumentiert. Der Messbetrieb wurde erst nach vollständigem Auslaufen der eingepressten Wassermenge wieder aufgenommen.

Die Sanierungsmaßnahme war erfolgreich: es gibt keine nennenswerten Unterschiede zwischen Sickerungsraten und –geschehen vor und nach der Rückspülung.

5.2.8 Rückbau

Stillgelegte Lysimetermessstellen müssen nach Beendigung des Messbetriebs zurückgebaut werden. Insbesondere die sichtbaren Konstruktionselemente (Regenmesser und Kontrollschacht) sind vollständig zu entfernen. Auf den Rückbau des unterirdischen Lysimeterbehälters kann ggf. verzichtet werden, sofern er keine Beeinträchtigung für den landwirtschaftlichen Betrieb darstellt. Falls das Lysimeter dennoch entfernt wird, empfiehlt es sich, die Bodenbeschaffenheit in- und außerhalb des Auffanggefäßes einer bodenkundlichen Untersuchung zu unterziehen. Die meisten Anlagen wurden bis zu ihrer Stilllegung nämlich über mehrere Jahrzehnte beobachtet, d.h. über sehr lange Zeiträume in denen die in den Lysimetertöpfen eingeschlossenen Bodenkörper von ihrem natürlichen Umfeld getrennt waren. Es ist vor diesem Hintergrund wünschenswert zu untersuchen, ob wichtige Funktionen des Naturhaushalts im Lysimeterbehälter, beispielsweise als Wasserspeicher, Pflanzenstandort oder Lebensraum nach wie vor mit den naturbelassenen Verhältnissen in der Umgebung übereinstimmen.

6 Messergebnisse Lysimeteranlage Büchig

6.1 Parameterumfang

Die Anlage Büchig besteht aus einem wägbaren und fünf nicht wägbaren Standardlysimetern nach Friedrich-Franzen sowie aus Geräten zur Messung von bodenphysikalischen und meteorologischen Parametern. Die verschiedenen Messgrößen werden kontinuierlich aufgenommen, täglich zur Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) der LUBW übertragen und stehen damit unmittelbar für Auswertungen zur Verfügung. Die gemessenen Parameter sind in Tabelle 6.1-1 zusammengestellt.

Der Messumfang ermöglicht eine standortscharfe und detaillierte Beschreibung der klimatischen Verhältnisse am Standort Büchig und somit die Ermittlung von für den Grundwasserhaushalt wesentlichen Randbedingungen. Diese Parameter wurden unter anderem gewählt, weil ihnen eine große Bedeutung als Eingangsdaten für zahlreiche digitale Simulationsmodelle oder empirische Verfahren zur Bestimmung der Grundwasserneubildung aus Niederschlägen zukommt. In der Vergangenheit konnten dadurch unterschiedliche Ansätze aus der Literatur für den Standort Büchig in der Praxis eingesetzt und plausibilisiert werden.

Die Messung der Sickerwassermengen erfolgte bis etwa 1990 durch Kippwaagen (Abbildung 6.1-1), die gegen Verdunstung geschützt untergebracht waren. Korrosion und zunehmende Reibungswiderstände im Kippmechanismus haben im Laufe der Jahre ansteigende Messunsicherheiten verursacht, die letztendlich zur Stilllegung dieser Messmethode geführt haben. Die Kippwaagen sind nach wie vor zu Anschauungszwecken erhalten, wobei die Sickerwassermengen nun ausschließlich von Hand erfasst werden. Schon vor 1990 wurden redundante Messungen von Hand zum Vergleich mit der Wägetechnik durchgeführt.

Durch entsprechende Nachrüstungen ist es möglich, das Messspektrum zu erweitern. Luken im Glasfaserbehälter ermöglichen die tiefendifferenzierte Probennahme des Sickerwassers sowie den Einbau von Messapparaturen in



Abbildung 6.1-1 Kippwaage für die Messung der Sickerwassermenge

den Bodenkörper (z.B. Tensiometer, Saugkerzen oder andere Messsonden). Chemische Analysen von Niederschlags- und Sickerwasser werden derzeit nicht durchgeführt (Stand 2018).

6.2 Vergleichende Betrachtung der fünf Standardlysimeter nach Friedrich-Franzen

Die Vielfalt der entwickelten Lysimetertypen für unterschiedliche Anwendungsbereiche ist ein Beleg dafür, wie umfangreich und deutlich sich Standorteigenschaften auf das Sickerwassergeschehen auswirken. Diese Vielfalt zeigt ebenfalls, dass jede eingesetzte Messtechnik mit Unsicherheiten behaftet ist. Eine primäre Aufgabe der Pilotstation Büchig bestand aus diesem Grund in der Überprüfung, ob Standardlysimeter nach Friedrich-Franzen, die unter ähnlichen baulichen und

Tabelle 6.1-1: Messumfang an der Lysimeteranlage Büchig (Stand 2017)

Gerät	Messgrößen	Besonderheit
Lysimeter I (wägbar) GW-Nummer 502/259-7	- Sickerwassermenge (cm ³) - Lysimetergewicht (kg)	- 3,14 m ² Auffangfläche - gestört (Boden eingefüllt) - ebenerdig - regelmäßige Eichung der Waage
Lysimeter II Friedrich-Franzen GW-Nummer 503/259-1	Sickerwassermenge (cm ³)	- 1 m ² Auffangfläche - gestört (Boden eingefüllt) - 55 cm unter Flur
Lysimeter III Friedrich-Franzen GW-Nummer 504/259-6	Sickerwassermenge (cm ³)	- 1 m ² Auffangfläche - gestört (Boden eingefüllt) - ebenerdig
Lysimeter IV Friedrich-Franzen GW-Nummer 505/259-0	Sickerwassermenge (cm ³)	- 1 m ² Auffangfläche - ungestört (Monolith) - ebenerdig
Lysimeter V Friedrich-Franzen GW-Nummer 506/259-5	Sickerwassermenge (cm ³)	- 1 m ² Auffangfläche - gestört (Boden eingefüllt) - 50 cm unter Flur
Lysimeter VI Friedrich-Franzen GW-Nummer 507/259-0	Sickerwassermenge (cm ³)	- 1 m ² Auffangfläche - ungestört (Monolith) - 48 cm unter Flur
Niederschlag GW-Nummer 402/259-2	Niederschlagsmenge (mm)	Regenmesser nach Hellmann in 1 m Höhe mit Windschutz
Niederschlagsmesser	Niederschlagsmenge (mm)	Regenmesser nach Hellmann in Bodenhöhe
Temperatursonde Grundwasser	- Temp. (°C) 6,0 m unter Flur - Temp. (°C) 4,7 m unter Flur	
Drucksonde	Abstich (m)	
Lufttemperaturfühler	- Temp. (°C) in Bodennähe - Temp. (°C) in 2 m Höhe	Erdbodentemperaturgeber
Hygro-Thermogeber	Luftfeuchte (%)	
Windmesser	Windgeschwindigkeit (m/s)	In 4 m Höhe über Gelände
Pyranometer	Globalstrahlung (W/m ²)	Strahlungsgeber nach Dirnhim
Barometer	Luftdruck (hPa)	

LUBW

bodenphysikalischen Bedingungen eingerichtet wurden sowie unter denselben klimatischen Verhältnissen betrieben werden, auch untereinander vergleichbare Messergebnisse liefern. Dazu wurden fünf Lysimeter nach Friedrich-Franzen auf engstem Raum installiert:

- Zwei Geräte wurden völlig identisch ausgeführt: die Lysimeter 2 und 5 sind beide unter gestörten Verhältnissen in rd. 50 cm unter Flur niedergebracht.
- Drei weitere Einrichtungen wurden in leicht unterschiedlichen Einbauweisen (gestört/monolithisch, ebenerdig/unterflur) zu Vergleichszwecken eingebaut (Tabelle 6.1-1 und Abbildung 6.2-1).

Ziel war es, die Robustheit der Lysimeterbeobachtungen unabhängig von Einbauverhältnissen oder aber umgekehrt, eine eindeutige Abhängigkeit zwischen gestörtem und ungestörtem Bodenkörper einerseits sowie ebenerdigem und unterirdischem Ausbau andererseits, heraus zu arbeiten.

Die Summenlinien der Sickerwassermengen der fünf Lysimeter nach etwa 36 Betriebsjahren im Zeitraum von August 1981 bis Dezember 2016 sind in Abbildung 6.2-1 dargestellt. Dabei sind folgende Sachverhalte erkennbar:

- Zwei wesentliche Trockenperioden sind im Gesamtzeitraum zu beobachten, nämlich die frühen 1990er Jahre sowie die Jahre 2003 bis etwa 2005. Die Einschnitte in die Sickerwasserzeitreihen waren ab 1989 besonders ausgeprägt und pausten sich bei sämtlichen fünf Lysimereinrichtungen durch. Im Jahr 2003 waren die Auswirkungen an den Monolithen vergleichsweise unscheinbar, aber die Anlagen mit gestörtem Bodeneinbau waren über mehrere Jahre dauerhaft rückläufig.
 - Die langjährigen gemessenen Sickerwassersummenwerte der fünf Lysimeter schwanken zwischen -6,6 % und +5,0 % stark um den Mittelwert. Dies entspricht mittleren Infiltrationsraten zwischen 33 % und 37 % der Jahresniederschläge. Angesichts der Messungenauigkeiten und der bekannten Störungen (z.B. Rückspülung, Verdichtungen usw.) kann diese Streuung von ± 2 % als wenig signifikant eingestuft werden. Sämtliche Einbauvarianten können demnach als akzeptable Beobachtungseinrichtungen für die Sickerwassermenge eingesetzt werden.
 - Die blau gestrichelten Summenkurven der beiden baugleichen Lysimeter 2 und 5 (gestörte Bodeneinfüllung, Einbau unterflur) weichen deutlich voneinander ab. Als logische Folgerung lässt sich daraus schließen, dass es sich bei Lysimetern um Punktmessungen mit systematischen Messungenauigkeiten handelt. Aggregierte Lysimeterdaten stellen bei Betrachtungen in ausreichend langen Zeitskalen (Monatsbasis und länger) durchaus eine fundierte Datengrundlage dar. Bei kürzeren Zeitfenstern sollten sie lediglich als Orientierungswerte betrachtet werden.
 - Die Bedeutung der Bodeneinbauverhältnisse (gestört / ungestört) lässt sich aus der Vergleichsbetrachtung nicht eindeutig abklären. Bei den Monolithen (durchgehende Linien in Abbildung 6.2-1) sind abgesehen von der Rückspülungsmaßnahme am Lysimeter 4 relativ gleichmäßige Infiltrationsraten über den gesamten Beobachtungszeitraum zu verzeichnen. Die Töpfe mit den gestörten Bodenverhältnissen sind vergleichsweise vermutlich etwas anfälliger auf meteorologische Einwirkungen, wie z.B. aus den anhaltenden Rückgängen seit 2000 abgeleitet werden kann.
 - Ein Einfluss der Einbautiefe auf die Infiltrationsraten wurde am Standort Büchig nicht nachgewiesen. Grundsätzlich sind die ebenerdigen Messeinrichtungen allerdings anfälliger auf Bodenverdichtungen als unterflur eingebaute Geräte.
 - Versickerungsverhältnisse können sich an einem Lysimeter im Laufe der Jahr(zehnt)e verändern. Am Lysimeter Büchig 5 sind im Vergleich zu den anderen Messstellen deutlich größere Infiltrationsraten im Zeitraum von 1994 bis etwa 1998 zu beobachten. Im Anschluss daran sind wiederum verminderte Versickerungen bis 2010 zu verzeichnen. Auf mögliche Ursachen für diese Alterungserscheinungen wird in der Messstellendokumentation in Anlage 1 eingegangen.
- Auf der Grundlage der Beobachtungen an den fünf Lysimetern nach Friedrich-Franzen der Anlage Büchig konnten keine eindeutigen Gesetzmäßigkeiten festgestellt werden, weder zwischen den unterschiedlichen Einbauweisen (gestört/ungestört) noch den verschiedenen Einbautiefen. Bei geringen Auffangflächen (1 m² beim Standardlysimeter) überlagern lokale Randfehler, z.B. Oaseneffekte, Makroporen (Mauselöcher...) usw., die Einflüsse des Bodenkörpers und der Einbauverhältnisse.
- Langzeitbeobachtungen über mehr als 35 Jahre zeigen darüber hinaus, dass sich das Infiltrationsgeschehen im Laufe der Zeit verändern kann. Bei den regulären Anlagen mit einem einzigen Lysimetergefäß sind allmähliche Entwicklungen schwer erkennbar, bzw. werden erst bei deutlichen Anzeichen augenfällig, beispielsweise bei außergewöhnlich langem Trockenfallen.
- Unter den genannten Gesichtspunkten sind Beobachtungen an Kleinlysimetern nach Friedrich-Franzen Punktmessungen, die sehr vorsichtig und ohne Gewähr auf andere Standorte bzw. größere Flächen übertragen werden sollen. Die etwa ab Monatsbasis aggregierten Messwerte liefern gesicherte Größenordnungen der Grundwasserneubildung aus Niederschlägen sowie Informationen über das instationäre Verhalten des Sickerwassers im ungesättigten Bodenbereich und werden somit den wesentlichen Anforderungen der Wasserwirtschaft gerecht.

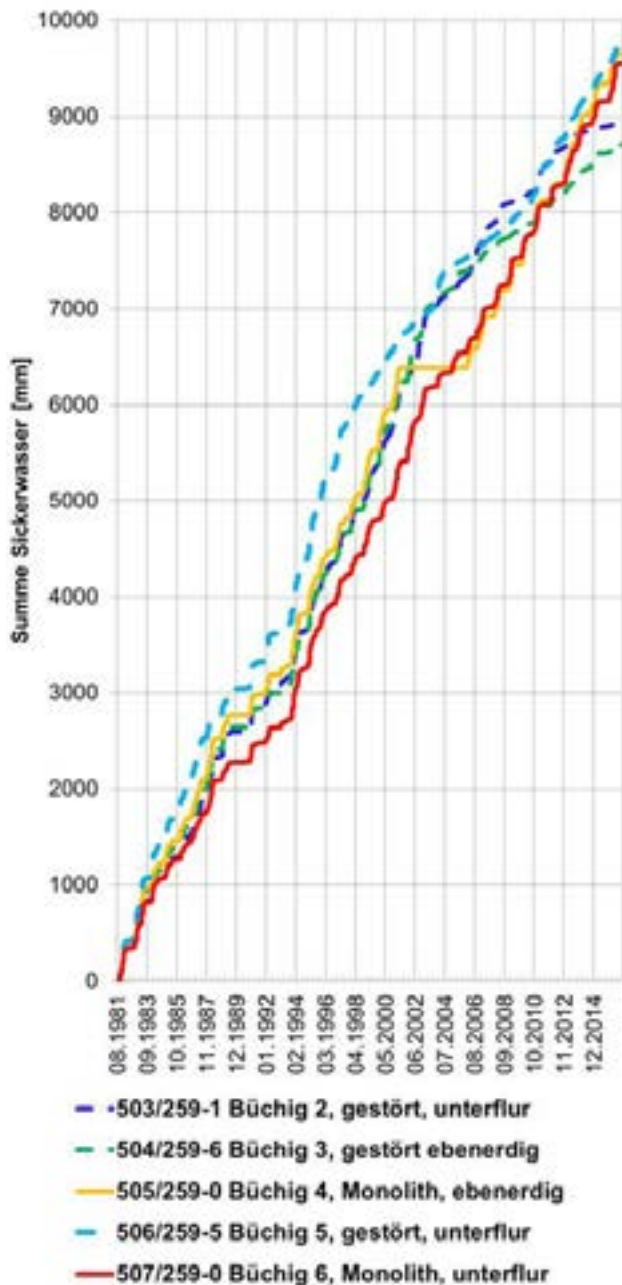


Abbildung 6.2-1: Summenkurven der Sickerwassermengen an den fünf Lysimetern nach Friedrich-Franzen der Anlage Büchig im Zeitraum

6.3 Ergebnisse am wägbaren Lysimeter

Wägbare Lysimeter bieten gegenüber Standardlysimeter nach Friedrich-Franzen Vorteile, die deutlich höhere Betriebskosten rechtfertigen. Die kontinuierliche Aufzeichnung des Lysimetergewichts ermöglicht beispielsweise Rückschlüsse über die Entwicklung der Bodenfeuchte, wodurch Aussagen über die aktuelle Verdunstung getroffen werden können (siehe Kapitel 2.4.4).

Außerdem sind aufgrund der größeren Auffangfläche (z.B. 3,14 m² am Standort Büchig) die Randeffekte geringer als bei den Kleinlysimetern nach Friedrich-Franzen mit 1 m².

Die seit 1981 betriebene Lysimeterstation Büchig ist der einzige Standort in Baden-Württemberg, der mit einem wägbaren Lysimeter und einer Klimastation ausgestattet wurde. Die Erfassung der unterschiedlichen Messparameter lässt auf die Zustandsentwicklung des Bodenwassergehalts und der Sickerwasserverhältnisse vor dem Hintergrund der aktuellen Wetterverhältnisse schließen. Die gewonnenen Informationen sind auf andere Standorte Baden-Württembergs zwar nicht unmittelbar übertragbar, liefern jedoch wichtige Hinweise für Interpretation und Prognose der Grundwasserneubildung aus Niederschlägen in den anderen Lockergesteinsaquiferen des Landes.

Exemplarische Auswertungen der wägbaren Lysimeteranlage Büchig werden in Abbildung 6.3-1 dargestellt:

- Die obere Grafik dokumentiert neben den meteorologischen Messgrößen Lufttemperatur (schwarze Kurve) und Globalstrahlung (orange Säulen) auch die berechnete Veränderung der Bodenfeuchte (grüne Fläche), die unmittelbar aus der Betrachtung der Gewichtsänderung des Lysimeterkörpers (dunkelgrüne Säulen) abgeleitet wird. Die Zunahme des Lysimetergewichts ist die Folge der Erhöhung der im Boden gespeicherten Wassermenge – und umgekehrt. Nach oben gerichtete positive Säulen zeigen somit ein Auffüllen, nach unten gerichteten Säulen eine Entleerung des Bodenwasserspeichers. Der Bodenwassersättigungsgrad ist zwar nicht exakt bestimmbar, aber es kann aufgrund der (langen) büchiger Datenreihe davon ausgegangen werden, dass der Boden zum Zeitpunkt mit dem maximalen Lysimetergewicht, gesättigt war. Dies war am Anfang des Winterhalbjahres 2011 im Dezember 2010 der Fall. Die zeitliche Entwicklung des Bodenwassergehalts (besser: des Fehlbetrags in [mm] bis zur Sättigung) bezogen auf den mutmaßlichen Sättigungszeitpunkt im Dezember 2010 ist als hellgrüne Fläche dargestellt: Je größer die Fläche, desto größer der Bodenwasserdefizit im Lysimeterkörper. Sämtliche Parameter sind als Monatsmittelwerte dargestellt.

- Die untere Grafik zeigt die monatlichen Niederschlags- und Sickerwassersummen (Säulen) vor dem Hintergrund der langjährigen Mittelwerte (Flächen). Die Verdunstung bzw. der Oberflächenabfluss wird auf Monatsbasis als Restglied aus der Betrachtung der relevanten Einzelkomponenten der Wasserbilanz nach folgender Gleichung berechnet:

$$N - S + G - V/A = 0$$

wobei N	monatliche Niederschlagsmenge
S	monatliche Versickerungsmenge
G	Monatliche Veränderung des mittleren Lysimetergewichts
V/A	aktuelle Verdunstung bzw. oberirdischer Abfluss

Bei seltenen starken Niederschlagsereignissen wie beispielsweise im November 2007 und Dezember 2011 kann es zu oberirdischen Abflüssen im Bereich des Lysimeterauffangbehälters kommen. Im Regelfall entspricht die rote Kurve jedoch ausschließlich der aktuellen Verdunstung. Mit Hilfe dieser Darstellungen ist eine relative präzise Beschreibung der Zustandsentwicklung des

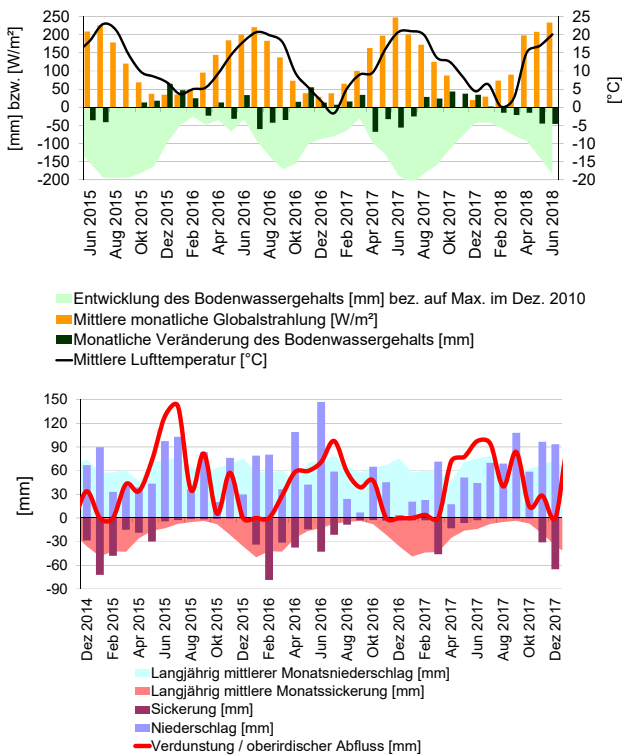


Abbildung 6.3-1: Auswertung verschiedener Messgrößen an der Klimastation und am wägbaren Lysimeter Büchig

Wasserhaushalts im ungesättigten Bodenbereich in Anbetracht der Witterung möglich. Wesentlicher Vorteil zu den nicht wägbaren Lysimetern ist insbesondere die Einschätzung der Bodenfeuchte.

Folgende Erkenntnisse können aus diesen Betrachtungen gewonnen werden:

- Die Versickerung findet im Wesentlichen in den Wintermonaten statt, wenn die Verdunstung am geringsten ist. Im Sommer hingegen findet im Regelfall keine nennenswerte Neubildung statt.
- Neben der Niederschlagsintensität stellt die Bodenfeuchte das maßgebliche Kriterium für die Versickerung dar. In einigen Situationen kann deshalb bei gut gefülltem Bodenwasserspeicher und trotz geringer Niederschlagsmenge eine beträchtliche Neubildung beobachtet werden, wie es z.B. im Februar 2015 der Fall war. Bei geringer Bodenfeuchte bleiben aus diesem Grund die Lysimeter trotz überdurchschnittlicher Niederschlagsmengen meist trocken wie z.B. im Sommer 2015.
- Außergewöhnlich starke Niederschlagsereignisse können selbst im Sommer und unabhängig von der Bodenfeuchte infiltrieren. Rasche Versickerungskomponenten entstehen in diesen Situationen durch Randeffekte oder Makroporen, z.B. Mauslöcher. Ein solches Ereignis, wie es im Juni 2016 stattgefunden hat, hat am Standort Büchig allerdings Seltenheitscharakter.
- Umgekehrt können auch geringe Niederschläge versickern, vorausgesetzt der Bodenwasserspeicher ist nahezu aufgefüllt. Die Bodenfeuchte ist grundsätzlich das entscheidende Kriterium für die Wiederkehr des Versickerungsprozesses nach einer Trockenphase (siehe März 2017).
- Die Versickerung wird trotz hoher Verdunstung und Pflanzenwachstum meist bis in die frühen Sommermonate fortgesetzt. Der Bodenwasserspeicher läuft dabei allmählich leer, weil die Wassermengen, die zu diesem Zeitpunkt bereits unterhalb der Wurzeltiefe angelangt sind, aufgrund der Erdanziehungskraft weiterhin in den Untergrund fließen.

- Wägbare Lysimeter ermöglichen fundierte Prognosen über die zu erwartende Versickerung und somit über die bevorstehende Entwicklung der Grundwasservorräte. Der Bodenwasserspeicher spielt die Rolle eines Puffers, der zur Trägheit und damit zur Prognosefähigkeit des Gesamtsystems beiträgt. Die Kombination von momentaner Bodenfeuchte (= Lysimetergewicht) und aktuellen Niederschlägen ermöglicht qualitative Aussagen über die kurzfristige Grundwasserneubildung aus Niederschlägen und somit über die Entwicklung der Grundwasservorräte. Quantitative Aussagen können nur grob beziffert werden. Bei einer Regionalisierung sind im Übrigen auch weitere Einflussgrößen zu berücksichtigen, beispielsweise die Austauschvorgänge zwischen Grundwasser und oberirdischen Gewässern (mit ggf. entfernten Einzugsgebieten), die ebenfalls eine erhebliche Rolle bei der Grundwasserdynamik spielen.

Im Vergleich zu den Standardlysimetern nach Friedrich-Franzen werden wägbare Lysimeter mit großem finanziellem, technischem und datenverarbeitungstechnischem sowie organisatorischem Aufwand hergestellt und betrieben. Die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen ist vor dem Hintergrund der erzielten Erkenntnisse und Aussagen zu prüfen.

Die Anlage Büchig liefert wertvolle Informationen über den Grundwasserhaushalt in der baden-württembergischen Oberrheinebene als einziger Standort, an welchem sowohl Niederschlag und Versickerung als auch die Bodenfeuchte berücksichtigt werden. Der Bau von weiteren wägbaren Lysimeteranlagen in Kombination mit einfachen Klimastationen in weiteren wasserwirtschaftlich bedeutenden Lockergesteinsaquiferen wäre von Vorteil für die Bewertung der aktuellen Verhältnisse insbesondere im Hinblick auf kurzfristige Prognosen der Grundwasserhaushaltsentwicklung.

7 Auswertung der langjährigen Lysimetermessungen

7.1 Grundsätzliche Erkenntnisse

Die Grundwasserneubildung aus Niederschlägen unterliegt einem ausgeprägten Jahresgang, wobei der versickernde Anteil der Winterniederschläge in der Regel erheblich höher ist als der versickernde Anteil der Sommerniederschläge. Dies liegt unter anderem an der im Winter durch die niedrige Lufttemperatur bedingten geringeren Verdunstung und dem pausierenden Pflanzenwachstum. Die sommerlichen Niederschläge sind mengenmäßig mit den Winterniederschlägen zwar vergleichbar, werden jedoch zum größten Teil durch Verdunstung verbraucht. Bei der Betrachtung der langjährigen Niederschlags- und Sickerwassermengen von Lysimetern sowie dem Grundwasserstand an benachbarten Messstellen wird deutlich, dass ein Zufluss zum Grundwasser und damit ein Anstieg des Grundwasserstands in erster Linie von den Winterniederschlägen abhängt. Besonders hohe Grundwasserverhältnisse finden überwiegend in Jahren mit überdurchschnittlichen Sickerungen im Sommerhalbjahr statt (Abbildung 7.1-1).

Aufgrund dieser Zusammenhänge erkennt man an zahlreichen Grundwasserstandsganglinien den synchronen

Verlauf mit den für das Grundwasser ausschlaggebenden Winterniederschlägen. Der im Wesentlichen vom Niederschlag bestimmte oberflächennahe Grundwasserstand steigt im Allgemeinen von November bis Februar an und fällt dann bis zum Ende des hydrologischen Jahres in den Monaten September / Oktober wieder ab. Die Analyse langjähriger Beobachtungsreihen von Niederschlag und Grundwasserstand deutet darauf hin, dass besonders die niederschlagsarmen Jahre 1971 bis 1977 einen deutlich spürbaren Einfluss auf die Grundwasserstände (Niedrigwasserperioden im Grundwasser) hatten (siehe Abbildung 7.1-1). Außergewöhnlich hohe Grundwasserstände werden demgegenüber insbesondere in Jahren mit vergleichsweise starken Versickerungen im Sommerhalbjahr erreicht, wie beispielsweise in den späten 1960er Jahren und 2013. Am Lysimeterstandort Rauental östlich von Rastatt wurde für den Zeitraum von 1964 bis 2016 berechnet, dass im Mittel 45 % der Jahresniederschläge in den Untergrund infiltrieren, wobei lediglich 20 % der Sommerniederschläge und immerhin 75 % der Winterniederschläge das Grundwasser erreichen.

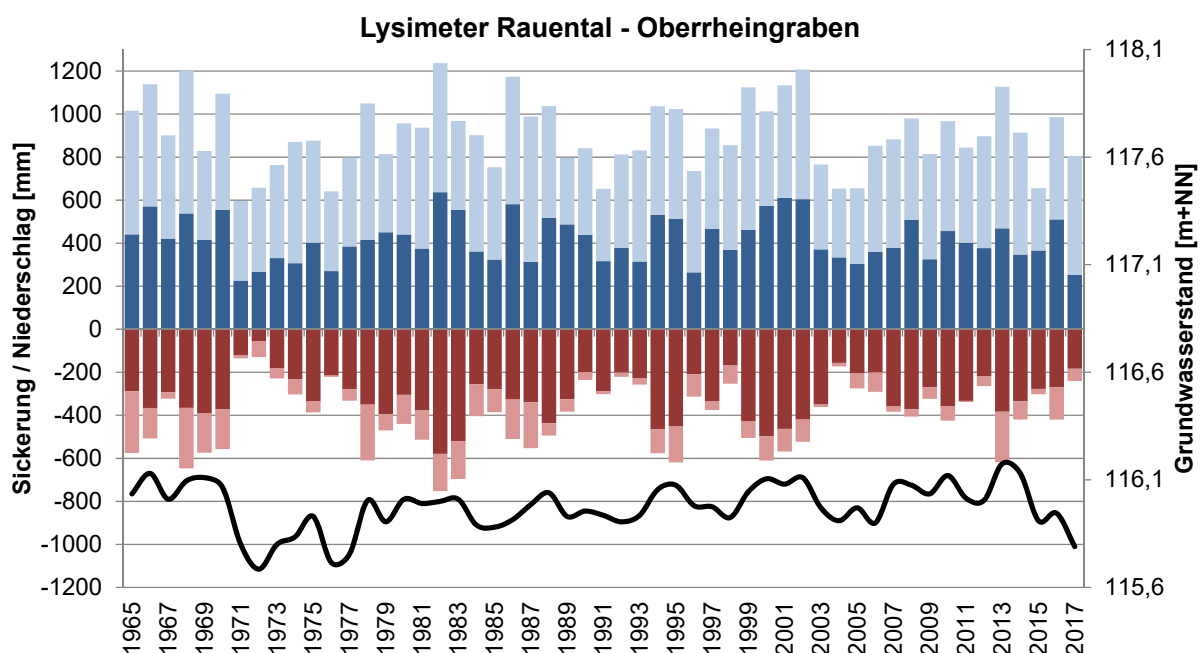


Abbildung 7.1-1: Hydrologische Halbjahressummen von Niederschlag und Sickerung am Lysimeter Rauental (Oberrheingraben) und örtlicher Grundwasserstand (Jahresmittel)

7.2 Statistische Mengenbetrachtungen und Auswertungen

7.2.1 Auswahl von Grundwasserstandsreferenzmessstellen

Die Berücksichtigung von benachbarten Grundwasserstandsmessstellen ist für die Auswertung von Lysimeterdaten nicht zwingend erforderlich. Mit deren Unterstützung wird jedoch eine fundierte Beurteilung der Auswirkung der Versickerung, d. h. der Grundwasserneubildung aus Niederschlägen auf die lokale Grundwasserdynamik gewährleistet.

Folgende Kriterien sind bei der Wahl einer Referenzmessstelle zu beachten. Die Grundwasserstandsmessstelle

- muss erkennbar und dominant vom Niederschlagsgeschehen geprägt sein.
- sollte in möglichst geringer Entfernung zum Lysimeterstandort liegen. Bei Entfernungen größer 1 bis 2 km muss unter ähnlichen klimatischen Randbedingungen auch sichergestellt sein, dass die Messstelle im gleichen Grundwasserleiter verfiltert ist und von keinen lokalen Beeinflussungen geprägt wird.
- soll möglichst unbeeinflusst von oberirdischen Gewässern oder Grundwasserförderungen sein. Die Wechselbeziehung zwischen Grundwasser und oberirdischen Gewässern sowie von Pumpbetrieb überlagern die rein versickerungsbedingten Grundwasserspiegelschwankungen und prägen meist die örtliche Grundwasserdynamik. Die Bewertung der Neubildungskomponenten wird dadurch erheblich erschwert. Gänzlich unbeeinflusste Messstellen sind selten aber die Lage und die Ganglinie der Grundwasserstände liefern meist einschlägige Hinweise über die Standorteigenschaften. In den zahlreichen Fällen, in denen die Lysimeter auf Wasserwerksgelände in unmittelbarer Nähe zu Entnahmebrunnen installiert wurden, empfiehlt es sich oft, entfernte Messstelle zu Referenzzwecken einzusetzen.
- soll möglichst seit Inbetriebnahme der Lysimeteranlage betrieben werden, damit die langjährigen statistischen Auswertungen auf einer gemeinsamen zeitlichen Basis durchgeführt werden können.

- soll wöchentlich oder häufiger gemessen werden, um die mögliche zeitliche Korrelation zwischen dem Versickerungsgeschehen und der Auswirkung auf die Grundwasserspiegelschwankungen mit der entsprechenden Diskretisierung untersuchen zu können.

7.2.2 Summenkurven

Niederschlags- und Sickerwasserdaten werden traditionell in Form von Summen- bzw. von Doppelsummenkurven abgebildet. Dabei werden die Einzelwerte oder bereits aggregierte Daten z. B. Wochen-, Monats-, Halbjahres- oder Jahressummen für einen definierten Zeitraum aufaddiert. Bei der einfachen Summenkurve werden auf der Abszisse der Zeitpunkt und auf der Ordinate die kumulierten Werte der gewählten Kennzahl aufgetragen. Die Summenkurve stellt die zeitliche Entwicklung der Merkmale dar.

An ihr lassen sich ungleichmäßige Entwicklungen sowie geringfügige aber im Laufe der Zeit erhebliche Abweichungen erkennen.

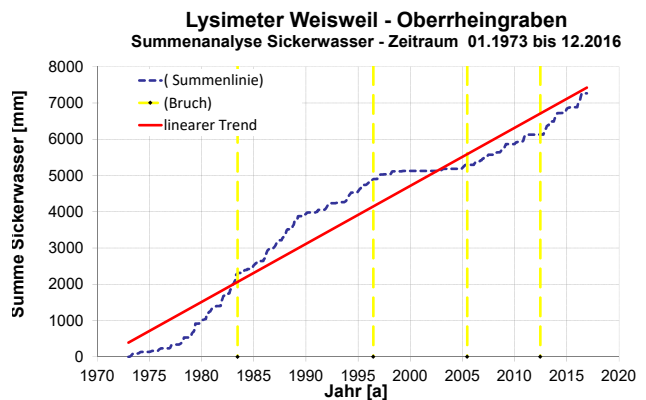


Abbildung 72-1: Summenkurve von Sickerwasser am Lysimeter Weisweil für den Zeitraum 1973-2016

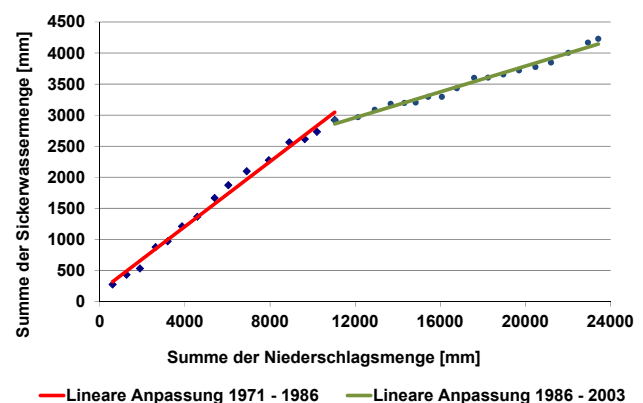


Abbildung 72-2: Doppelsummenkurve von Niederschlag und Sickerwasser (aus Jahressummen) am Lysimeter Buggingen für den Zeitraum 1971-2003

Am Beispiel des Lysimeters Weisweil (GW-Nr. 0500/068-5) wird der Rückgang der Infiltrationsrate – ab etwa dem Jahr 1985 bis 2005 – infolge einer heranwachsenden Strauchhecke und die anschließende Normalisierung nach der Rodung deutlich (Abbildung 7.2-1). Der lineare Trend (rote Linie) unterstreicht die Abweichungen vom mittleren Verhalten. Bei den Bruchpunkten (gelbe gestrichelte Linien) handelt es sich um signifikante Sprünge nach der parametrischen „local-jump-detection“-Methode nach Qiu / Yandell (1998) (aus [8]). Bei dieser Methode werden Veränderungen der Steigung entlang der Summenkurve als Zeichen für Inhomogenitäten in der Zeitreihe gewertet. Mitte der 1980er Jahre wird im angeführten Beispiel eine Verringerung der Sickerung bis etwa 1996 beobachtet; ab diesem Zeitpunkt war die Anlage bis 2005 trocken. Der Sprung im Jahr 2013 wird durch einen plötzlichen Anstieg der Sickerung begründet. Am Beispiel des Lysimeters Weisweil wird deutlich, dass sowohl messmethodische Mängel (z. B. heranwachsende Vegetation, Bodenverdichtungen, Messlücken usw.) als auch tiefgreifende meteorologische Veränderungen (z.B. nachhaltige Nass- und Trockenphasen) mit dieser klassischen Darstellungsform detektiert werden können.

Doppelsummenkurven stellen eine Variante der einfachen Summenkurve dar, indem die kumulierten Sickerwassermengen nicht gegen die Zeit sondern gegen die Niederschlagssumme dargestellt werden. Auch in diesem Fall werden Einzelwerte oder voraggregierte Daten z. B. Wochen-, Monats-, Halbjahres- oder Jahressummen für einen definierten Zeitraum aufaddiert. In dieser Darstellungsvariante steht das Verhältnis zwischen Niederschlag und Sickerung bzw. die Infiltrationsrate im Vordergrund, wobei z. B. die unterschiedlichen Sickerwasserraten in den Sommer- und Winterhalbjahren deutlich werden. In Langzeitbetrachtungen bildet eine Regressionsgerade die Verteilung der Punkteschar üblicherweise in guter Näherung nach. Änderungen im Sickerwasserablauf, z. B. infolge von Undichtigkeiten des Lysimeterbehälters oder der Ablaufleitung, bewirken eine Krümmung der Verteilung. In Abbildung 7.2-2 wird eine Verminderung der beobachteten Versickerungsrate an der Anlage Buggingen ab dem Jahr 1986 dargestellt. Nach Befragung des Landwirts konnte die Ursache für die Veränderung geklärt werden, nämlich die Verdichtung des

Bodenkörpers infolge des Einsatzes von neuen, breiten und schweren Landmaschinen im Bereich des Lysimeterbehälters. Auch unscheinbare Drifterscheinungen können anhand der Doppelsummenkurven erkannt werden, weswegen diese Darstellungsform meistens für die Beurteilung der Langzeitstabilität des Sickerungsgeschehens der Lysimeteranlagen verwendet wird. Summenkurven (Sickerung gegen die Zeit) und Doppelsummenkurven (Niederschlag gegen Sickerung) der amtlichen Lysimeteranlagen Baden-Württembergs sind im Anhang zu finden.

7.2.3 Säulendiagramme ohne und mit langjährigem Hintergrund

Säulendiagramme gehören neben den Summenkurven zu den klassischen Darstellungsformen von Lysimeterdaten. Sie bestehen aus aggregierten Summendaten in bestimmten Zeiteinheiten und verdeutlichen die zeitliche Entwicklung von Niederschlag und Versickerung ggf. vor dem Hintergrund der langjährigen Mittelwerte (Abbildungen 7.2-3 und 7.2-5). Diese Art der Darstellung empfiehlt sich für die Veranschaulichung von aggregierten Lysimeterdaten in Monats- oder besser Jahressummen. Neben der einfachen Dokumentation der Messwerte in einem Zeitfenster sind dabei ebenfalls die Verhaltensweisen von Niederschlags- und Sickerwasserdaten, Periodizitäten und weitere Lysimereigenschaften darstellbar, z. B. Eintrittszeitpunkt und Dauer von Trockenphasen, Infiltrationsraten in Sommer-

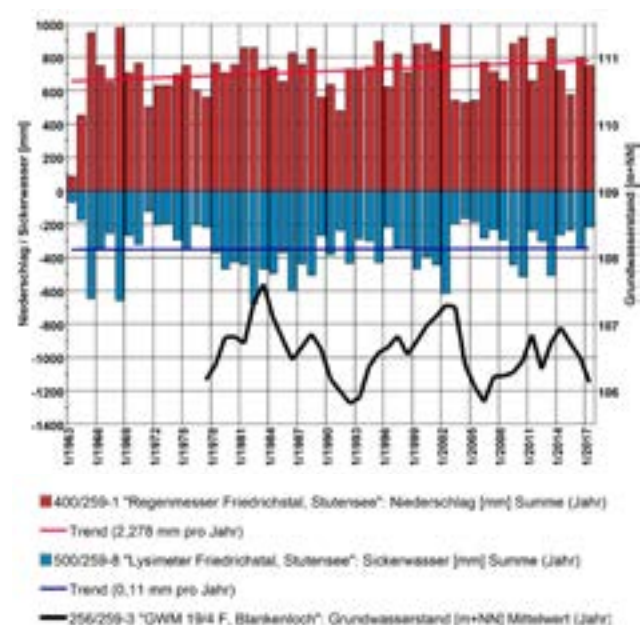


Abbildung 7.2-3: Entwicklung von Niederschlag, Sickerwasser und Grundwasserstand am Lysimeter Friedrichstal (Jahreswerte)

und Winterhalbjahren usw. Die Darstellung kann neben den Lysimeterdaten auch den linearen Trend oder die Entwicklung der umliegenden Grundwasserstände im Betrachtungszeitraum enthalten. In Abbildung 7.2-3 ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den jährlichen Sickerwassermengen und den Jahresmittelwerten des Grundwasserstands am Standort Friedrichstal feststellbar.

Aufgrund der zunehmenden Bedeutung der Niedrigwasser- und Trockenphasen, in denen keine nennenswerte Grundwasserneubildung stattfindet, wird neuerdings eine weitere Beobachtung herangezogen, nämlich die Anzahl der Wochen pro Jahr, in denen ein Lysimeter kein Sickerwasser führt bzw. trocken war (Abbildung 7.2-4). Im Regelfall sind nach solchen Unterbrechungen größere Niederschlagsmengen erforderlich, um den Versickerungsprozess wieder in Gang zu setzen, als sie für seine Erhaltung bei (teil-)gefülltem Bodenspeicher notwendig sind. Die Anzahl der versickerungsfreien Wochen ist im Übrigen ein nachvollziehbares Kriterium für Häufigkeit und Dauer von Trockenstressperioden für die Vegetation infolge geringer Bodenfeuchte. In Abbildung 7.2-4 kommen am Lysimeter Kappel (Oberreingraben) das extreme Trockenjahr 1976 mit 22 Wochen zur Geltung sowie der Zeitraum von 2003 bis 2006 mit gleich mehreren aufeinanderfolgenden trockenen Jahren.

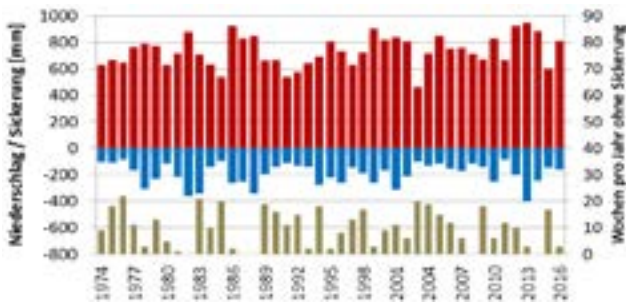


Abbildung 7.2-4: Niederschlag, Sickerwasser und Anzahl Wochen ohne Sickerung am Lysimeter Kappel (Jahreswerte)

Speziell bei der Betrachtung von Monatssummenzeitreihen über mehrere Jahre empfiehlt es sich, die Messdaten vor dem Hintergrund der langjährigen Mittelwerte zu betrachten (Abbildung 7.2-5). Einerseits unterliegt die Sickerung typischen jahreszeitlichen Schwankungen, andererseits gibt es kein eindeutiges Muster für den Jahresgang. Jedes Beobachtungsjahr weist Besonderheiten

sowohl hinsichtlich der Ausprägung als auch der zeitlichen Abfolge der meteorologischen Ereignisse auf. Die Niederschläge haben im Mittel ebenfalls meist einen jährlichen Gang, der jedoch deutlich weniger ausgeprägt ist als beim Sickerwasser. Dabei fallen die größten Niederschlagsmengen in den Monaten Mai und Juni, also im Frühsommer, die geringsten Niederschlagsmengen in den Monaten Januar bis März, also im Winter an. Diese innerjährliche Verteilung wird sich im Zuge des Klimawandels in den kommenden Jahrzehnten ändern, wobei die Klimaprojektionen mehr Niederschlag im Winter und weniger im Sommer prognostizieren. Die Jahresniederschläge dürften in der Summe etwa gleichbleiben.

Nachfolgende Dateninhalte auf Monatsbasis sind in Abbildung 7.2-5 dargestellt:

- Die nach oben gerichteten dunkelroten Säulen stellen die Monatssummen des Niederschlags am Lysimeterstandort pro Zeiteinheit (Monat) dar.
- Die nach unten gerichteten dunkelblauen Säulen stellen die Monatssummen des Sickerwassers am Lysimeterstandort pro Zeiteinheit (Monat) dar.

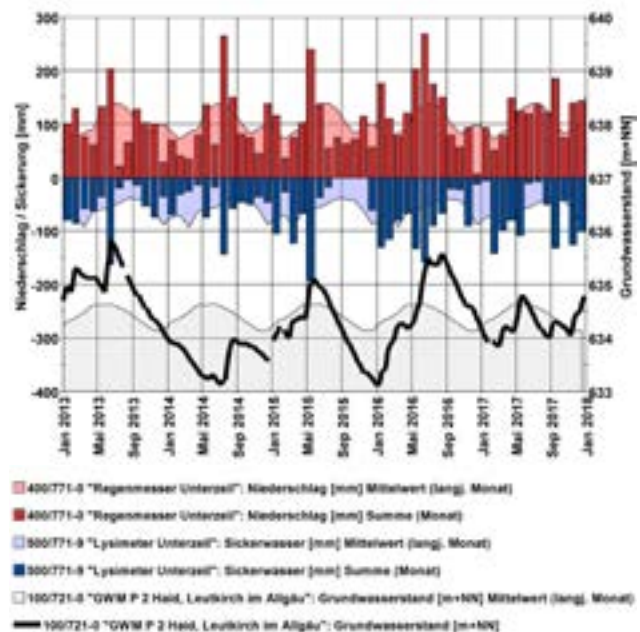


Abbildung 7.2-5: Niederschlag, Sickerwasser und Grundwasserstand am Lysimeter Unterzeil in den Jahren 2012 bis 2016 vor langjährigem Hintergrund – hier: 1978 bis 2017

- Die nach oben gerichteten hellroten Flächen stellen die langjährig mittleren Monatssummen des Niederschlags am Lysimeterstandort in einem definierten Zeitraum dar.
- Die nach unten gerichteten hellblauen Flächen stellen die langjährig mittleren Monatssummen des Sickerwassers am Lysimeterstandort in einem definierten Zeitraum dar.

Ergänzend kommt die Darstellung der Grundwasserdynamik an einer benachbarten Grundwasserstandsreferenzmessstelle im unteren Teil der Graphik hinzu:

- Die Ganglinie der Grundwasserstände ist als schwarze Linie dargestellt.
- Die langjährig mittleren Monatsmittelwerte des Grundwasserstands in einem definierten, mit der Auswertung der Lysimetermessungen möglichst übereinstimmenden Zeitraum sind als hellgraue Fläche im Hintergrund dargestellt.

Säulendiagramme der amtlichen Lysimeteranlagen Baden-Württembergs sind – teilweise kommentiert – im Anhang zu finden.

7.2.4 Autokorrelation

Bei der Autokorrelation wird eine Datenreihe mit sich selbst verglichen, um Zusammenhänge oder Muster innerhalb dieser Reihe zu erkennen, insbesondere wenn keine lineare Abhängigkeit bzw. eindeutige Regression vorliegt. Zeitreihen werden dabei schrittweise um jeweils eine Zeiteinheit gegen sich selbst verschoben und mit der Ausgangsreihe korreliert². Wenn identische Strukturen oder gewisse Trägheiten an verschiedenen Stellen der Reihe vorhanden sind, treten diese in der Autokorrelation als markante Peaks hervor. Die dabei errechneten Korrelationskoeffizienten werden in einem sogenannten Autokorrelogramm grafisch dargestellt. Liegen signifikante Autokorrelationskoeffizienten vor, dann ist von einer zeitlichen Abhängigkeit der aktuellen Werte mit vorangegangenen und / oder von Zyklen in der Zeitreihe auszugehen.

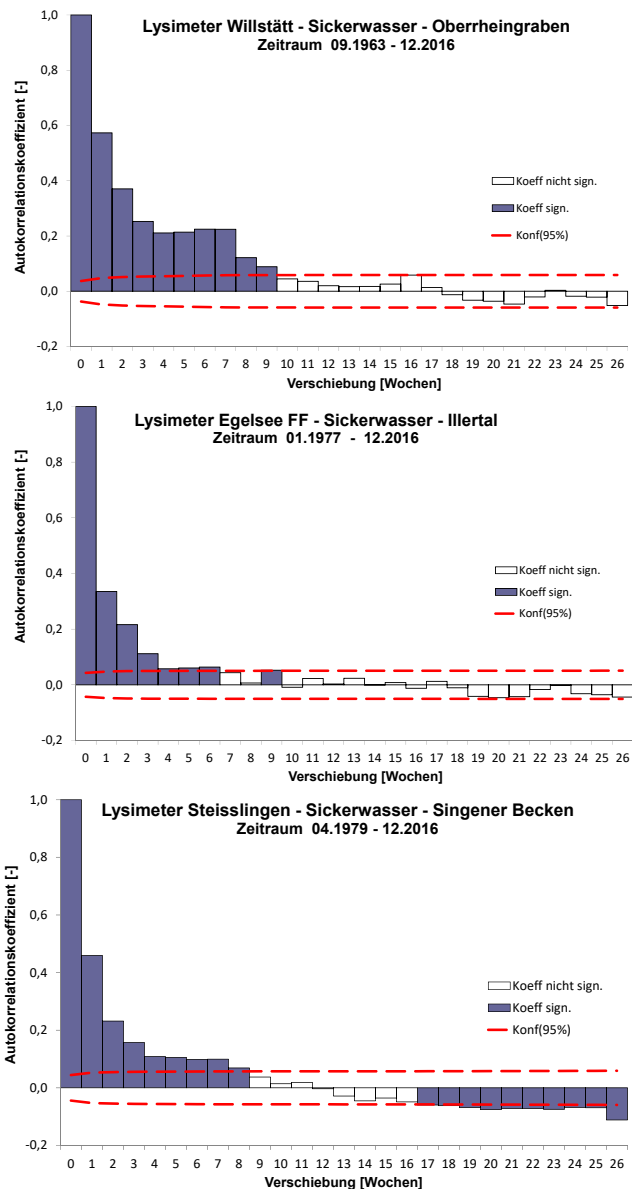


Abbildung 7.2-6: Autokorrelogramme der Wochensummen des Sickerwassers an verschiedenen Lysimetern (Wochensummen)

Wichtiger Hinweis: die Betrachtung und Deutung von Autokorrelogrammen der Sickerwasserreihen muss völlig unabhängig und losgelöst vom Niederschlagsgeschehen durchgeführt werden.

Die bei Lysimeterdaten beobachteten zeitlichen Verzögerungen stellen gute Voraussetzungen für Autokorrelationsbetrachtungen mit täglicher³, wöchentlicher oder monatlicher Zeitverschiebung dar. Größe und Verteilung der Autokorrelationskoeffizienten geben Hinweise über die mittleren Verweilzeiten in der ungesättigten Bodenzone, die Abflussverzögerung in den tieferen Untergrund und das Auslaufverhalten des Bodenwasserspeichers. Die An-

² Das Autokorrelationsverfahren setzt die Verwendung von äquidistanten und lückenlosen Zeitreihen voraus.

³ Auf tägliche Zeitverschiebungen wurde aufgrund unzureichender Datengrundlage verzichtet.

zahl bzw. die Dauer der Verschiebungen mit signifikanten Autokorrelationskoeffizienten ist ein hilfreiches Indiz für die Dauer der sommerlichen Trockenphasen.

Ausgewählte Autokorrelogramme sind in Abbildung 7.2-6 dargestellt. An den Lysimetern Egelsee und Steißlingen sind Zeitverschiebungen von 3 bis 4 Wochen signifikant. Die starke Pufferwirkung der ungesättigten Bodenzone kommt dadurch zum Ausdruck, dass sowohl einzelne Sickerphasen als auch Trockenphasen im Schnitt nicht länger als 3 bis 4 Wochen andauern. Die etwas bindigere Bodenverhältnisse (tonigschluffiger Lehm über Grobkies) am Standort Egelsee regulieren stärker den Bodenwasserhaushalt bzw. haben ein größeres Retentionsvermögen als das Gemisch aus Braunerde und Schottern am Standort Steißlingen. Dauer und Ausmaß von Trockenzeiten werden am Standort Willstätt weniger gedämpft. Das Lysimeter Willstätt wurde in flachgründigem feinsandigem Boden am Fuß des Kinzigdamms eingerichtet. Unter diesen Bedingungen finden eine vergleichsweise rasche Versickerung und geringe Retention statt; das Infiltrat sickert durch die gut durchlässige Bodenzone und erreicht relativ unbeeinträchtigt spätestens nach 8 bis zu 9 Wochen den Grundwasserspiegel. Umgekehrt dauert es nach Trockenphasen mehrere Wochen bis zur Erholung der Bodenfeuchte und rund 2 Monate bevor der Neubildungsprozess wieder in Gang gesetzt wird. Dieses Phänomen ist bei Lysimeteranlagen, die unter flachgründigen, sandigkiesigen Bodenverhältnissen gestochen wurden, besonders stark ausgeprägt.

Die beim Lysimeter Steißlingen als signifikant eingestuft (negativen) Koeffizienten ab Woche 17 sind ein Hinweis für die ausgeprägte Periodizität bzw. die jahreszeitliche Abfolge von nassen und trockenen Abschnitten in etwa halbjährlichem Zyklus (Abbildung 7.2-6).

7.2.5 Kreuzkorrelation

Kreuzkorrelationen drücken einen Zusammenhang zwischen zwei unterschiedlichen Zeitreihen, die zeitschrittweise gegeneinander verschoben werden, aus. Zu jedem Zeitschritt wird ein Korrelationskoeffizient zwischen den beiden Zeitreihen berechnet. Dieser Ansatz eignet sich im Grundsatz für die Erkennung von sogenannten schwachen Stationaritäten bzw. von wiederkehrenden Ähnlichkeiten bei bestimmten Zeitverschiebungen. Da der Austritts-

zeitpunkt der Versickerung erst mit einer zeitlichen Verzögerung nach einem Niederschlagsereignis stattfindet, ist eine derartige Gesetzmäßigkeit bei Lysimeterdaten naheliegend.

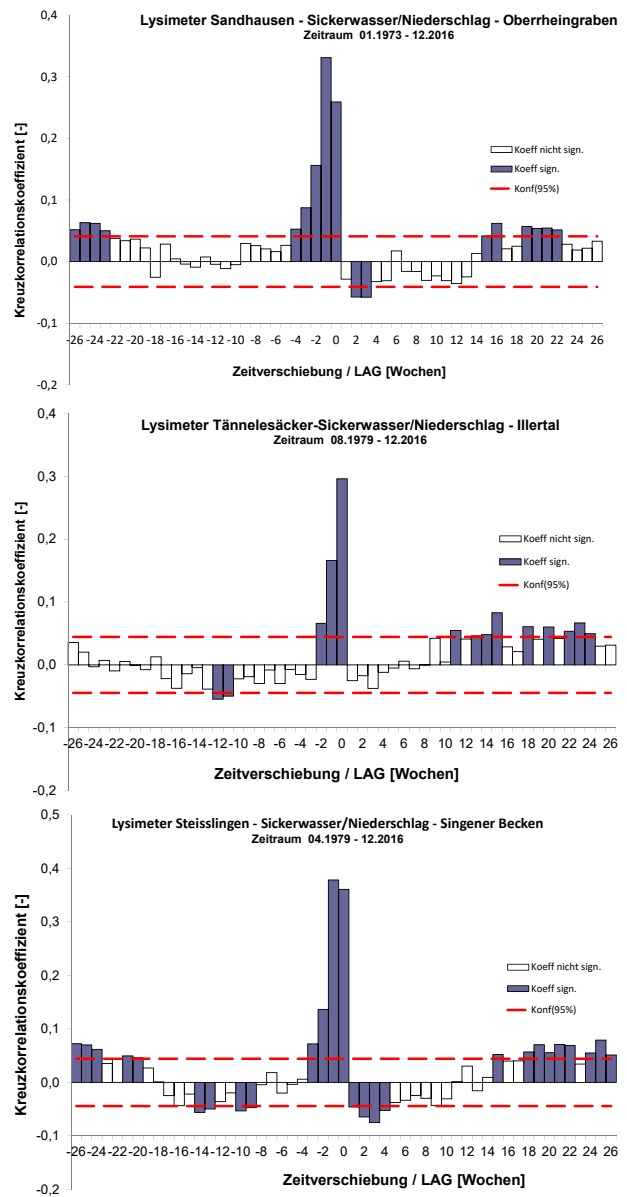


Abbildung 7.2-7: Kreuzkorrelation der Wochensummen von Sickerwasser über Niederschlag durch wöchentliche Zeitverschiebung an verschiedenen Lysimetern

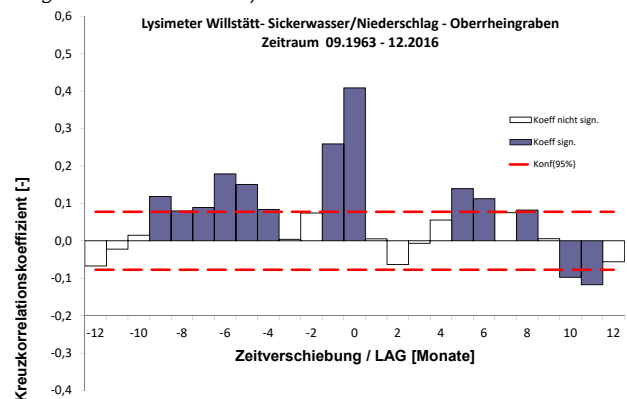


Abbildung 7.2-8: Kreuzkorrelation der Monatssummen von Sickerwasser über Niederschlag durch monatliche Zeitverschiebung am Lysimeter Willstätt

Ziel des Auswerteverfahrens ist neben der Bestätigung solcher Abhängigkeiten auch die Erkennung von standorttypischen Zeitinkrementen bzw. von charakteristischen Verzögerungen zwischen Niederschlag und Sickerung.

Die Zeitverschiebung soll in bestmöglicher zeitlicher Auflösung, zweckmäßigerweise in Tagesschritten erfolgen, damit insbesondere die unmittelbaren Auswirkungen der Winterniederschläge auf die Infiltration unter nahezu gesättigten Bodenwasserverhältnissen zum Ausdruck kommen können. Die Voraussetzungen für die Verschiebung in Tagesschritten sind im Lysimetermessnetz des Landes Baden-Württemberg jedoch nicht gegeben, da keine tägliche Messung stattfindet. Die vorgestellten Auswertungen wurden deshalb mit einer Verschiebung in Wochen- und Monatsschritten vorgenommen.

Beispielhafte Ergebnisdarstellungen sind in Abbildung 7.2-7 aufgeführt. Am Lysimeter Sandhausen wird die beste Korrelation für eine zeitliche Verzögerung zwischen den Wochensummen von Niederschlag und Versickerung nach einer Woche erreicht, wobei die Kreuzkorrelationskoeffizienten auf einen signifikanten Zusammenhang zwischen den Reihen bei Zeitverschiebungen zwischen Null und vier Wochen hindeuten. Diese Auswertung ermöglicht die Aussage, dass ein Niederschlagsereignis am Standort Sandhausen nach etwa einer und spätestens nach vier Wochen zur Grundwasserneubildung beiträgt in Abhängigkeit von Bodenfeuchte und Niederschlagsintensität.

In allen drei Darstellungen wurden neben den hydrologisch erklärlichen signifikanten Korrelationskoeffizienten, die der plausiblen Sequenz „zuerst Niederschlag – danach Sickerung“ entsprechen, weitere Zeitverschiebungsschritte als mathematisch signifikant eingestuft. Für die signifikanten Korrelationen auf dem positiven Teil der X-Achse gibt es keine logische Erklärung (es gibt keinen Zusammenhang zwischen der aktuellen Sickerung und dem künftigen Niederschlag) und sie sind als reine mathematische Artefakte zu werten. Signifikante Koeffizienten im negativen Bereich der X-Achse – etwa größer 10 Wochen – sind zwar theoretisch vorstellbar, dürften jedoch aus der Witterungsvielfalt der Beobachtungsjahre entstanden sein und können als stochastisches Signal eingestuft werden.

Die Verschiebung von Monatssummen zeigt am Beispiel des Lysimeters Willstätt (Abbildung 7.2-8), dass die beste Anpassung der beiden Reihen Niederschlag und Versickerung wie erwartet ohne zeitliche Verschiebung erreicht wird, wobei auch bei einer einmonatigen Verschiebung eine Beziehung zwischen Niederschlag und Versickerung festgestellt wird. Die Interpretationsmöglichkeiten sind aufgrund der zugrundeliegenden zeitlichen Diskretisierung jedoch relativ eingeschränkt: Niederschläge versickern am Lysimeter Willstätt im Regelfall relativ zeitnah oder innerhalb eines Monats. Die berechneten Abhängigkeiten nach viermonatiger Zeitverschiebung werden durch keine fachlichen Hintergründe untermauert und sind aus diesem Grund rein zufällig.

Bei den bisherigen statistischen Korrelationsbetrachtungen wurde ein essentieller fachlicher Aspekt nicht berücksichtigt, nämlich die innerjährliche Differenzierung des Sickerungsgeschehens. Wie bereits mehrfach erwähnt wird im Winterhalbjahr unmittelbar nach bzw. meist nahezu zeitgleich mit einem Niederschlagsereignis ein Sickerwasseraustritt beobachtet. Hauptursache dafür ist die Sättigung der Bodenfeuchte, die jegliche Aufnahme von zusätzlichen Wassermengen unterbindet. Die infiltrierenden Niederschläge verdrängen in dieser Situation das bis dahin eingespeicherte Bodenwasser weiter in die Tiefe, worauf ein Sickerwasseraustritt in den Lysimeterkontrollschacht folgt.

In Abbildung 7.2-9 werden die starke Streuung der Kreuzkorrelationskoeffizienten und die rasche Abnahme dieser Werte bereits nach einer Woche Zeitverschiebung im hydrologischen Winterhalbjahr am Beispiel des Lysimeters Sandhausen deutlich. Ebenso markant ist allerdings die vergleichsweise gute Korrelation ohne Zeitverschiebung. Es handelt sich dort um einen leichten, sandigkiesigen Boden mit geringem Retentionsvermögen. Der beobachtete Effekt ist bei tiefgründigen Böden noch ausgeprägter.

Im Sommerhalbjahr ist die Verdunstung im Regelfall höher als die anfallenden Niederschläge. In der Bodenzone besteht daher sehr bald ein Wasserdefizit in der Wurzelzone. Die Lysimetermessungen dokumentieren das Auslaufen des Bodenwasserspeichers in frühen Sommermonaten. Die gemäß einer klassischen Trockenwetterfalllinie rückläufigen Sickerwassermengen sind z.T. Wochen bis Monate zuvor in

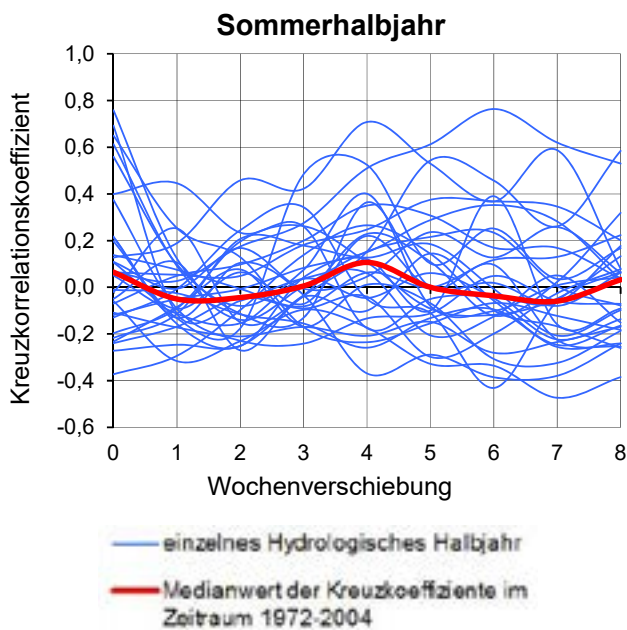


Abbildung 7.2-9: Kreuzkorrelation der Wochensummen von Sommerniederschlag über Sommersickerwasser durch wöchentliche Zeitverschiebung am Lysimeter Sandhausen für den Zeitraum 1972-2004

den Boden infiltriert. Der zeitliche Verzug hängt u.a. von der Witterung sowie vom Bodenwasserhaushalt ab und ist dadurch von Jahr zu Jahr sehr veränderlich. Die größere Bandbreite der Kreuzkorrelationskoeffizienten im Sommer (Abbildung 7.2-9) als im Winter (Abbildung 7.2-10) deutet auf eine höhere Variabilität beim Neubildungsgeschehen. Im hydrologischen Sommerhalbjahr gibt es ganz offensichtlich kein einheitliches Zeitgesetz zwischen Niederschlag und Neubildung.

7.2.6 Weitere Auswertungsverfahren

Neben den bis dahin vorgestellten klassischen Auswerteverfahren gibt es weitere Methoden, die sich im hydrologischen Bereich bereits bewährt haben und auch aufgrund ihres ausgeprägten saisonalen Charakters für Lysimeterdaten in Frage kommen. Es handelt sich im Wesentlichen um Verfahren im Saisonalität- und Frequenzbereich, die in der Praxis zwar insgesamt wenig Anwendung finden, aber im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht unerwähnt bleiben sollen. Die starke Jahresperiodik der Grundwasserneubildung wurde bereits mehrfach erwähnt und mit Hilfe von unterschiedlichen Darstellungen veranschaulicht. Das Verfahren nach Pardé wird in der Oberflächenhydrologie für die Kennzeichnung von Abflussregimen, also des regelmäßig wiederkehrenden mittleren Monatsabflusses eines Fließgewässers, verwendet. Beim Sickerwasser wird in Anlehnung daran das Verhältnis zwischen der mittleren monatlichen Sickerung zur

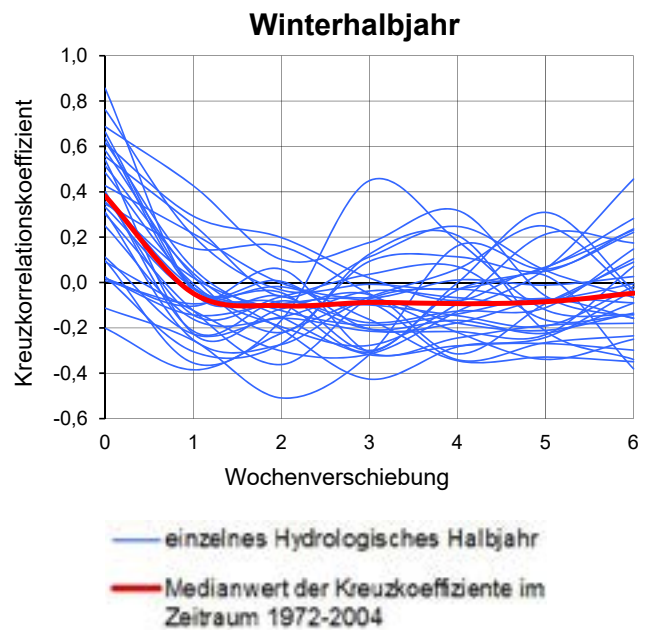


Abbildung 7.2-10: Kreuzkorrelation der Wochensummen von Winterniederschlag über Wintersickerwasser durch wöchentliche Zeitverschiebung am Lysimeter Sandhausen für den Zeitraum 1972-2004

mittleren Jahressicker-wassermenge gebildet. Die somit errechneten Monatskoeffizienten ergeben das Sickerwasserregime einer Lysimeteranlage und widerspiegeln die relative Bedeutung der monatlichen und saisonalen Beiträge zur gesamten Neubildung (Abbildung 7.2-11).

Mit der Spektralanalyse können neben dem Jahreszyklus auch weitere unterschwellige Frequenzen bzw. Periodizitäten in Zeitreihen erkannt werden. Die monatlichen Sickerwassermengen wurden diesem Analyseverfahren mit dem Ergebnis unterzogen, dass der Jahreszyklus (12 Monate in Abbildung 7.2-12) dominant und signifikant in den Spektren zum Ausdruck kommt. Der Anteil von weiteren zyklischen Komponenten ist stets gering und lediglich in Ausnahmefällen signifikant, so z. B.

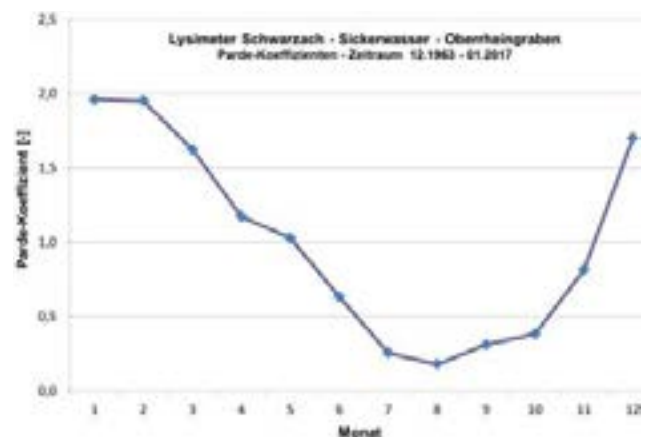


Abbildung 7.2-11: Verteilung der Pardé-Koeffizienten der monatlichen Versickerung am Lysimeter Schwarzach (Monatssummen)

im Fall des Lysimeters Tännelssäcker bei einer Periode von 3,5 Monaten (Abbildung 7.2-12). Bei diesen Nebenpeaks handelt es sich vermutlich um fachlich nicht erklärbare Oberschwingungen der dominanten Jahresperiodik. Spektralanalysen mit Wochensummen sind wenig aufschlussreich. Für die spektralanalytische Bestimmung von mehrjährigen Jahreszyklen ist die Datengrundlage nicht ausreichend.

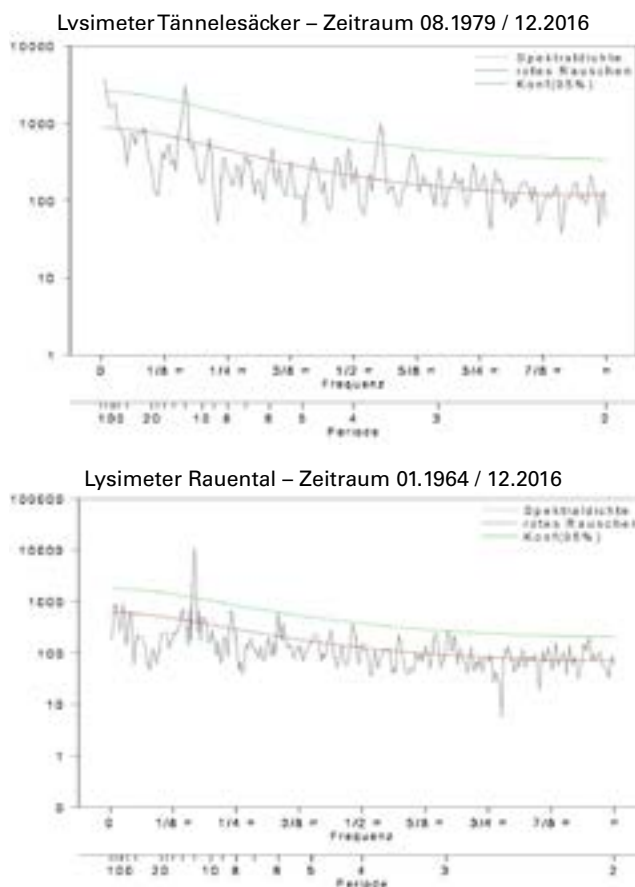


Abbildung 7.2-12: Spektralanalyse an den Lysimetern Tännelssäcker und Rauental (Monatssummen)

7.3 Wesentliche Erkenntnisse

Menge und Zeitpunkt der Versickerung – kurz: Lysimeterdaten – sind das Resultat aus dem Zusammenspiel von zahlreichen standortspezifischen Eigenschaften und Randbedingungen und sollen daher als reine Punktmessungen gewertet werden. Die Regionalisierung von Sickerraten ist im Grunde daher nicht zulässig. Lysimeterdaten liefern jedoch wichtige Größenordnungen und Vergleichsdaten sowohl für die Abschätzung als auch für die Plausibilisierung der Grundwasserneubildungsberechnung mit den gängigen Modellen und Verfahren.

Die Grundwasserneubildung aus Niederschlägen unterliegt einem ausgeprägten Jahreszyklus mit hohen Sickerraten im Winter und einer geringen Ausbeute im Sommer. Von diesem strengen Naturgesetz wird jedoch in immer häufigeren extremen, sowohl nassen als auch trockenen Perioden abgewichen. Die niedrigen Grundwasserstände im Jahr 2017 waren beispielsweise die Folge der geringen Neubildung im Winter 2016/17.

Es gibt einen ausgeprägten Zusammenhang zwischen den Jahresniederschlägen und den Sickerwasserraten im Winterhalbjahr. Je höher die Jahresniederschlagsmenge, desto höher fällt auch die Sickerrate im Winterhalbjahr aus. Im Sommerhalbjahr ist ein solcher Zusammenhang nicht erkennbar. Das Vorhandensein einer Bodenfeuchte im Spätsommer begünstigt den Sickerprozess, der zu einem früheren Zeitpunkt eintritt und somit über einen längeren Zeitraum stattfinden kann. In regenreichen Gebieten fallen die Lysimeter seltener und kurzzeitiger trocken als in niederschlagsarmen Gegenden.

Dauer und Häufigkeit von Trocken- und Nassperioden dürften eine nachgeordnete Rolle beim Sickerungsgeschehen spielen. Selbst in Zeiten ausgeprägter Trockenperioden sind die Sickerraten stabil. Ein Memory-Effekt, z.B. infolge der Ausbildung von Makroporen oder einer Bodenkruste o. ä., wurde bei den baden-württembergischen Lysimeterstandorten nicht beobachtet. Die Trockenphasen von Lysimetern in leichten Böden sind meist kürzer als in tonigem oder schluffigem Untergrund. In leichten Böden ist offenbar die Schwerkraft die vorherrschende Antriebskraft für die Versickerung. In schweren Böden mit höherer Feldkapazität reicht die alleinige Wirkung der Gravitation vermutlich nicht aus, um die kapillaren Kräfte in der Bodenmatrix zu überwinden. In diesem Fall muss zusätzlicher Druck „von oben“ aufgebaut werden in Form von Nachschub von infiltrierendem Niederschlagswasser, um den Versickerungsprozess zu erhalten bzw. nach einer Trockenphase wieder in Gang zu setzen.

Wägbare Lysimeteranlagen geben Hinweise über die Bodenfeuchte und können dadurch als zuverlässige Prognoseinstrumente für die bevorstehende Veränderung der Sickerraten und der Grundwasserstände bzw. Grundwasservorräte herangezogen werden. Ein gesättigter

Bodenwasserspeicher begünstigt die Neubildung und wird bei feuchter Witterung mit großer Wahrscheinlichkeit Grundwasseranstiege zur Folge haben. Umgekehrt wird ein ausgetrockneter Boden zunächst Wasser aufnehmen, bevor eine nennenswerte Durchsickerung und anschließend ein Grundwasseranstieg stattfinden können.

In dieser Situation sind stabile oder rückläufige Verhältnisse angesagt. Wesentliche Charakteristika und statistische Kenngrößen von 36 ausgewählten Lysimeterstationen sind in Tabelle 7.3-1 zusammenfassend aufgestellt. Weitere Details und Auswertungen sind in Anlage 1 zu finden.

Tabelle 7.3-1: Zusammenstellung von Stammdaten und statistischen Kenngrößen ausgewählter Lysimeter

GW-Nr.	Bezeichnung	Bodentyp	Einbau	Überdeckung [m]	Naturraum	Geländehöhe [m+NN]	Landnutzung	Beobvon	Beobbis	Niederschlag [mm]	Sickerung [mm]	Sickerraten			Trockenheit [W ₀ / J]
												KJ	WH	SH	
0500/770-7	Aitrach	Feinkies + Sand	Monolith	0	Illertal	613	Grünland	1977	-	1173	623	85	31	5	
0501/769-0	Bonlanden	Lehm über Kies	Monolith	0	Illertal	559	Grünland	1976	-	948	485	51	88	29	3
0502/259-7	Büchig 1 wägbar	Braunerde	gestört	0	nördl. Oberrhein	114	Grünland	1982	-	742	258	35	61	14	0
0503/259-1	Büchig 2	Braunerde	gestört	0,55	nördl. Oberrhein	114	Grünland	1982	-	742	250	34	49	20	2
0504/259-6	Büchig 3	Braunerde	Monolith	0	nördl. Oberrhein	114	Grünland	1982	-	742	243	33	55	13	5
0505/259-0	Büchig 4	Braunerde	Monolith	0	nördl. Oberrhein	114	Grünland	1982	-	742	270	36	64	12	13
0506/259-5	Büchig 5	Braunerde	gestört	0,5	nördl. Oberrhein	114	Grünland	1982	-	742	274	37	55	21	1
0507/259-0	Büchig 6	Braunerde	Monolith	0,48	nördl. Oberrhein	114	Grünland	1982	-	742	268	36	61	14	2
0500/021-1	Buggingen	Lehm über Kies	Monolith	0,5	Südl. Oberrhein	223	Ackerland	1971	2009	729	122	17	32	7	31
0503/210-4	Durmersheim	Feinkies und Sand	Monolith	0	mittl. Oberrhein	118	Grünland	1968	-	948	485	51	88	29	12
0502/769-4	Egelsee FF	Lehm über Kies	Monolith	0,05	Illertal	577	Grünland	1976	-	812	380	47	72	31	5
0500/115-4	Eigersweier	Feinkies und Sand	Monolith	0,2	mittl. Oberrhein	156	Steuobstwiese	1974	-	875	346	40	66	20	2
0500/259-8	Friedrichstal	Braunerde	Monolith	0,41	nördl. Oberrhein	112	Grünland	1963	-	729	358	49	77	26	0
0500/772-0	Friesenhöfen	Schluff über Kies	Monolith	0	Illertal	706	Grünland	1977	-	1409	1221	87	130	54	1
0500/258-6	Graben-Neudorf	Braunerde	Monolith	0,46	nördl. Oberrhein	108	Ackerland	1964	-	656	244	37	60	20	4
0500/065-4	Ichenheim	Feinkies und Sand	Monolith	0,67	mittl. Oberrhein	149	Ackerland	1974	-	742	179	24	44	10	9
0500/767-1	Illerreden I	Braunerde	Monolith	0,5	Illertal	495	Ackerland	1977	1999	811	259	32	58	16	5
0501/767-6	Illerreden II	Braunerde	Monolith	0	Illertal	495	Steuobstwiese	1977	-	826	174	21	38	11	12
0500/067-8	Kappel	Ton über Kies	Monolith	0,5	mittl. Oberrhein	163	Ackerland	1973	-	727	191	26	47	13	11
0500/066-6	Lahr	Lehm	gestört	0	mittl. Oberrhein	156	Grünland	1963	-	757	319	42	69	24	13
0502/210-0	Neuburgweier-Außen	Feinkies und Sand	Monolith	0,58	mittl. Oberrhein	107	Ackerland	1973	-	741	310	42	71	17	2
0501/210-5	Neuburgweier-Innen	Feinkies und Sand	Monolith	0	mittl. Oberrhein	107	Grünland	1973	-	741	287	39	74	9	12
0500/257-4	Oberhausen	Braunerde	Monolith	0	Rhein-Neckar	104	Grünland	1973	2003	656	304	46	68	29	7
0500/211-2	Raental	schluffiger Feinsand	Monolith	0,44	mittl. Oberrhein	127	Steuobstwiese	1963	-	902	408	45	75	20	8
0502/422-4	Rielsingen	Schotter	Monolith	0	Singener Becken	420	Grünland	1979	-	858	308	36	69	12	17
0503/306-9	Sandhausen	Mittel- und Feinsand	Monolith	0,14	Rhein-Neckar	104	Grünland	1972	-	685	254	37	70	12	15
0500/070-3	Sankt Georgen	n.b.	Monolith	0,4	Freiburger Bucht	228	Ackerland	1975	-	848	375	44	72	26	1
0500/305-3	Schriesheim	Feinkies und Sand	Monolith	0	Rhein-Neckar	105	Grünland	1973	-	677	176	26	47	11	7
0500/162-4	Schwarzbach	schluffiger Feinsand	Monolith	0,43	mittl. Oberrhein	129	Ackerland	1963	-	818	247	30	54	12	22
0500/422-5	Steißlingen	Schotter	Monolith	0,3	Singener Becken	433	Grünland	1979	-	831	319	38	68	18	12
0500/769-5	Tännesacker	schluffiger Feinsand	gestört	0,3	Illertal	553	Grünland	1979	-	924	371	40	72	21	18
0500/771-9	Unterzell	Schluff über Kies	Monolith	0	Illertal	640	Grünland	1977	-	1230	738	60	87	40	3
0500/069-7	Vörstetten	feinsandiger Schluff	Monolith	0,5	Freiburger Bucht	203	Grünland	1975	-	853	246	29	52	14	5
0500/304-1	Weinheim-Bauhof	Feinkies und Sand	gestört	0	Rhein-Neckar	97	Grünland	1972	2011	663	196	30	54	10	23
0500/068-5	Weisweil	feinsandiger Schluff	Monolith	0,5	mittl. Oberrhein	172	Ackerland	1973	-	661	165	25	48	12	30
0500/114-2	Wilsstätt	feinsandiger Schluff	Monolith	0	mittl. Oberrhein	142	Grünland	1963	-	775	314	40	65	23	9

LUBW

4 Literaturverzeichnis

[1]

DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 114, Empfehlungen zum Bau und Betrieb von Lysimetern – Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK) – Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 1980.

[2]

Schweiger P., Binkele V. & Traub R.: Nitrat im Grundwasser – Agrar- und Umweltforschung in Baden-Württemberg, Band 20 – Ministerium für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Ministerium für Umwelt – Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1989.

[3]

Rahmenkonzept Grundwassermessnetz – Handbuch Wasser 3, Grundwasserschutz 1, Grundwasserüberwachungsprogramm Baden-Württemberg – Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg – Karlsruhe, 1996.

[4]

Unveröffentlichtes Konzept zur Optimierung und Erweiterung des Lysimetermessnetzes von Baden-Württemberg im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg – Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe – Karlsruhe, 1996.

[5]

Leitfaden Grundwasserprobennahme und Grundwasserschutz 46, Grundwasserüberwachungsprogramm Baden-Württemberg – Landesanstalt für Umweltschutz, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg – Karlsruhe, 2013.

[6]

Friedrich, W. & Franzen H.: Ein neuer Versickerungsmesser – Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Heft 4, Seiten 105-111 – Koblenz, 1960.

[7]

Schroeder, M.: Die Entwicklung der Lysimetertechnik im Lande Nordrhein-Westfalen – Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Heft 6, Seiten 165-173 – Koblenz, 1987.

[8]

Willems, W., Dick, Th., Stricker, K., Kasper, G.: Benutzerhandbuch HyStat – Ingenieurhydrologie, Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik, IAWG 2003-2011 – Ottobrunn, 2011

Anlage 1: Messstellendokumentation

GW-Nr.	Bezeichnung	Seite
0500/770-7	Aitrach	48
0501/769-0	Bonlanden	50
0502/259-7	Büchig 1 wägbar	52
0503/259-1	Büchig 2	54
0504/259-6	Büchig 3	56
0505/259-0	Büchig 4	58
0506/259-5	Büchig 5	60
0507/259-0	Büchig 6	62
0500/021-1	Buggingen	64
0503/210-4	Durmersheim	66
0503/769-9	Egelsee Bohrlysimeter	68
0502/769-4	Egelsee FF	70
0500/115-4	Elgersweier	72
0500/259-8	Friedrichstal	74
0500/772-0	Friesenhofen	76
0500/258-6	Graben-Neudorf	78
0500/065-4	Ichenheim	80
0500/767-1	Illerrieden I	82
0501/767-6	Illerrieden II	84
0500/067-8	Kappel	86
0500/066-6	Lahr	88
0502/210-0	Neuburgweier-Außen	90
0501/210-5	Neuburgweier-Innen	92
0500/257-4	Oberhausen	94
0500/211-2	Rauental	96
0502/422-4	Rielasingen	98
0503/306-9	Sandhausen	100
0500/070-3	Sankt Georgen	102
0500/305-3	Schriesheim	104
0500/162-4	Schwarzach	106
0500/422-5	Steißlingen	108
0500/769-5	Tännelesäcker	110
0500/771-9	Unterzeil	112
0500/069-7	Vörstetten	114
0500/304-1	Weinheim-Bauhof	116
0500/068-5	Weisweil	118
0500/114-2	Willstätt	120

Lysimeteranlage Aitrach-Oberhausen

Niederschlagsmessstelle: 0400/770-7

Sickerwassermessstelle: 0500/770-7

Referenzgrundwassermessstelle: 0177/770-1

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	ungestört (Monolith)
Bodenüberdeckung:	ebenerdig	Geländehöhe:	612,91 m+NN
Bodentyp:	Schluff über Sand und Kies	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Donau-Ablach-Platten	Inbetriebnahme:	01.07.1977
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann mit Windschutz

Entfernung GW-Messstelle: 550 m

Mittlerer Flurabstand: 16 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



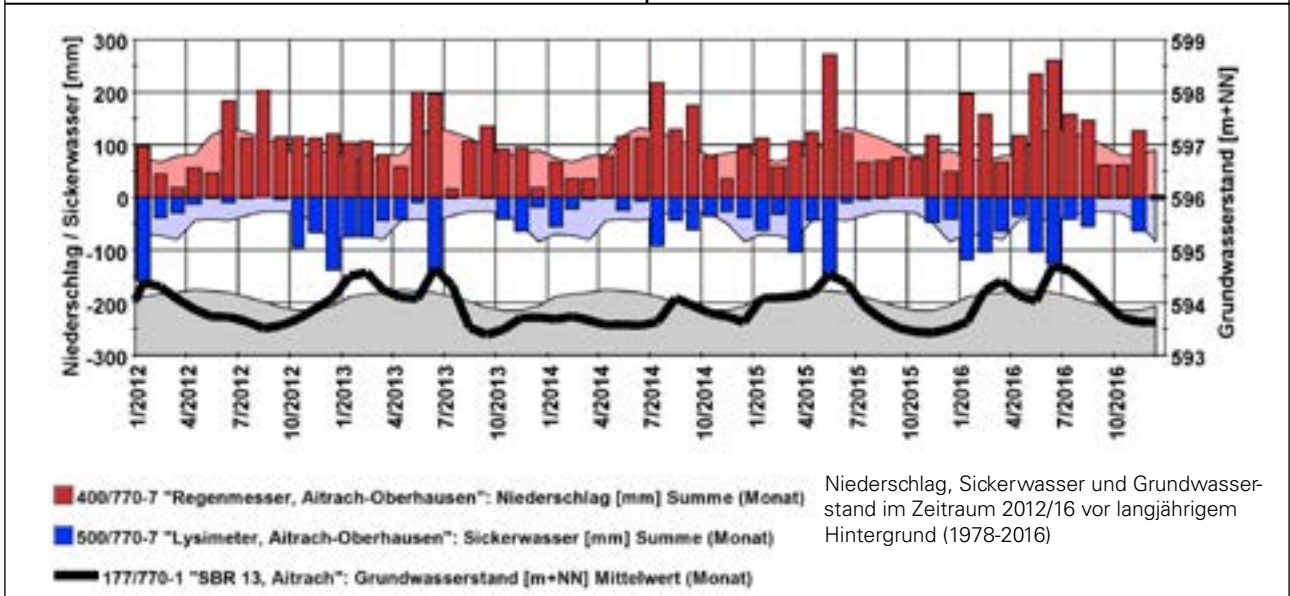
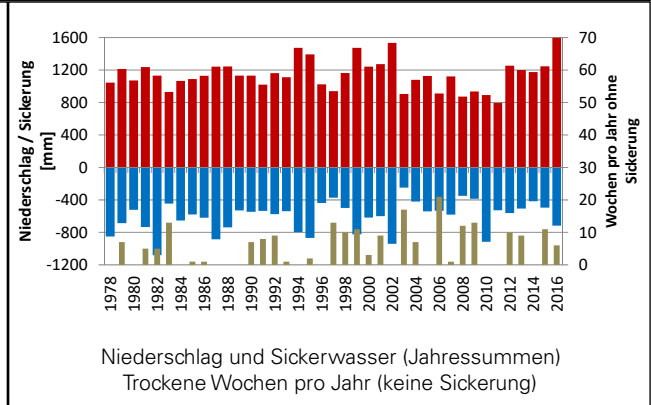
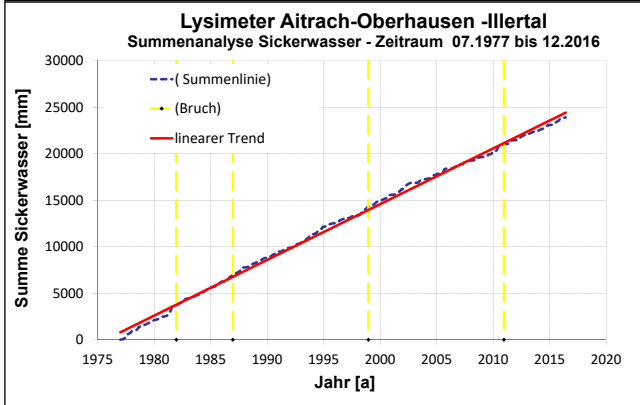
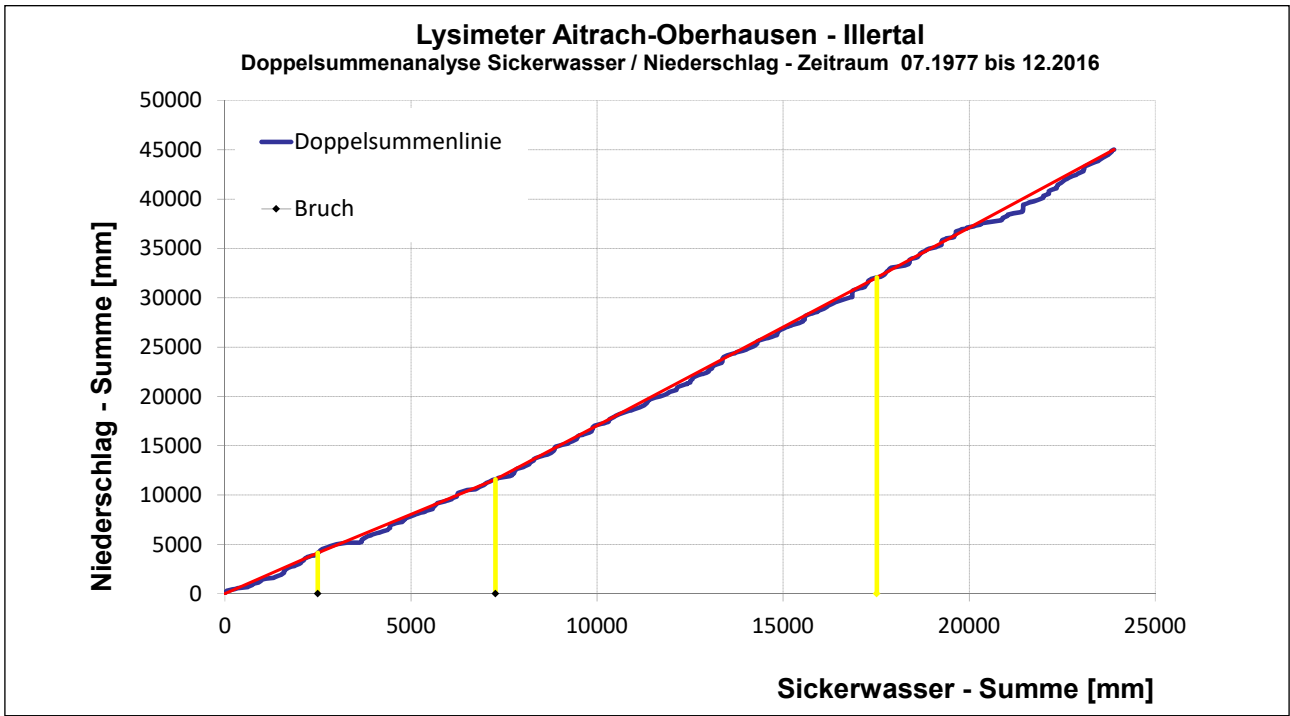
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Der Regenmesser ist nicht in näherer Umgebung des Lysimeters aufgestellt. Das Sickerverhalten ist im gesamten Beobachtungszeitraum unauffällig stabil.



Eckdaten (Zeitraum 1978-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	1.173 mm	Sickerwasser:	623 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 53%		Sommerhalbjahr: 31%	Winterhalbjahr: 85%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	5	Maximum: 21 Wochen (2006) Minimum: 0 Wochen (in 14 von 39 Jahren)		

Lysimeteranlage Bonlanden

Niederschlagsmessstelle: 0401/769-3
Sickerwassermessstelle: 0501/769-0
Referenzgrundwassermessstelle: 0193/769-2

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	Ungestört (Monolith)
Bodenüberdeckung:	ebenerdig	Geländehöhe:	559,45 m+NN
Bodentyp:	lehmiger Kies	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Holzstöcke	Inbetriebnahme:	01.05.1976
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 2.900 m
Mittlerer Flurabstand: ca. 6 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



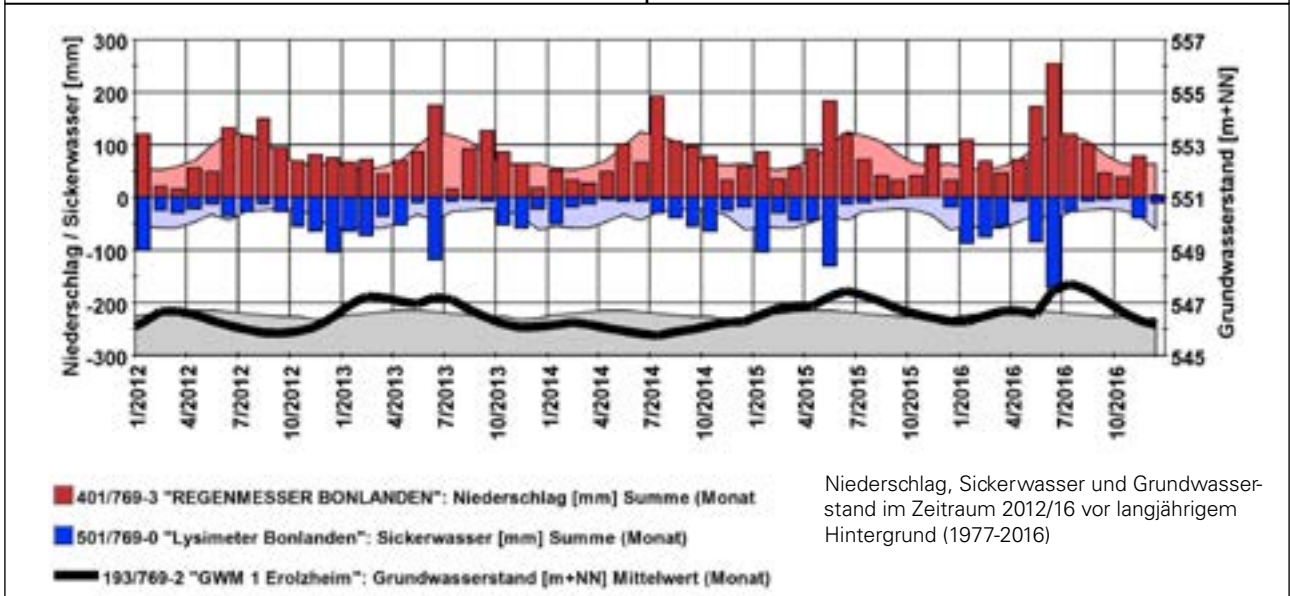
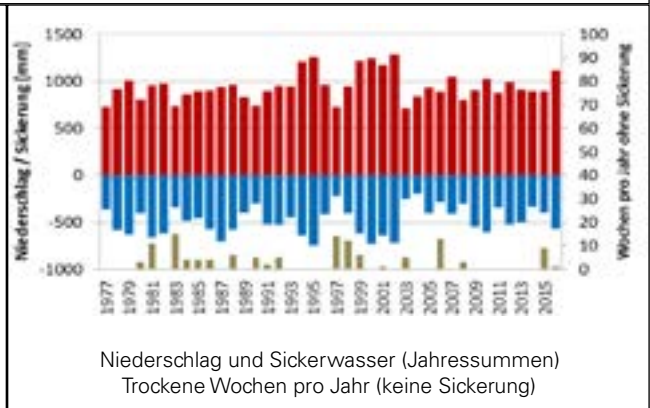
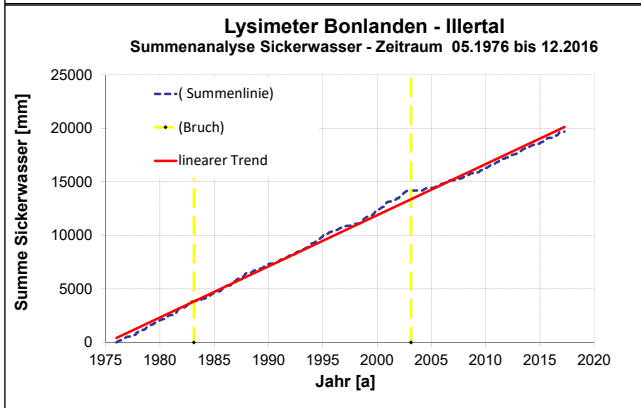
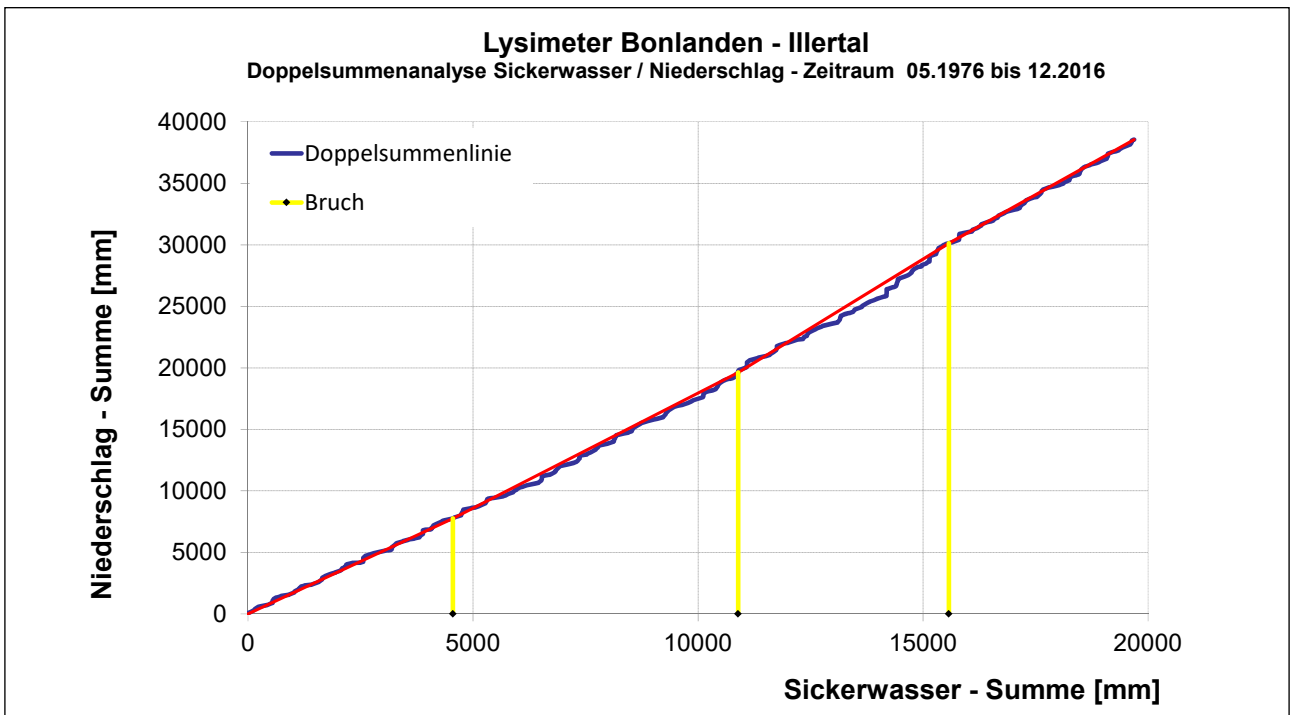
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Das Lysimeter befindet sich auf einem ehemaligen Pumpwerkgelände. Seit 2005 wird die gesamte Sickerwassermenge erfasst; zuvor wurde die Eimerüberlaufmenge nicht registriert.



Eckdaten (Zeitraum 1977-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	948 mm	Sickerwasser:	485 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 51%		Sommerhalbjahr: 29%	Winterhalbjahr: 88%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	3	Maximum: 15 Wochen (1983) Minimum: 0 Wochen (in 23 von 40 Jahren)		

Lysimeteranlage Büchig I

Niederschlagsmessstelle: 0402/259-2
Sickerwassermessstelle: 0502/259-7
Referenzgrundwassermessstelle: 0256/259-3

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	wägbar	Bodenkörper:	gestört
Bodenüberdeckung:	ebenerdig	Geländehöhe:	113,56 m+NN
Bodentyp:	Sandbraunerde	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Hardtebenen	Inbetriebnahme:	01.02.1981
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 4.700 m
Mittlerer Flurabstand: 5,5 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



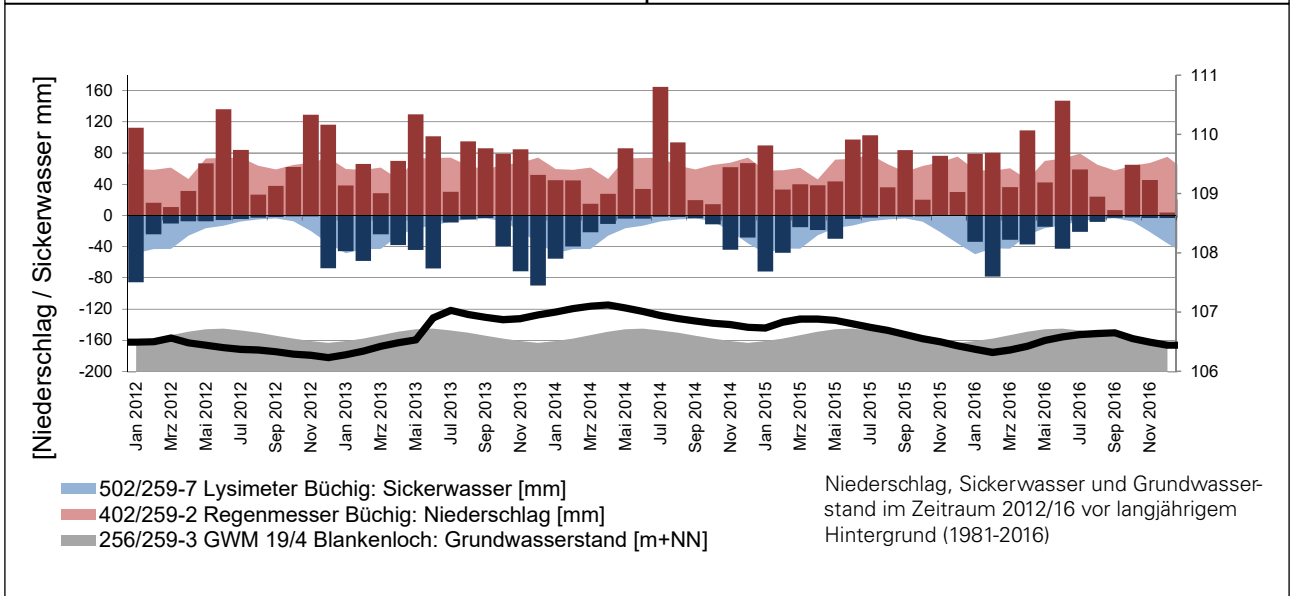
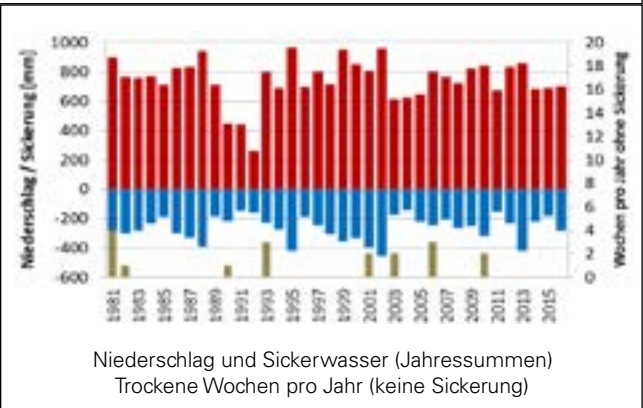
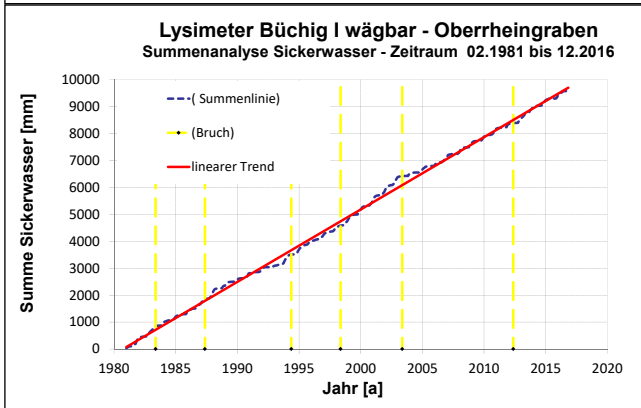
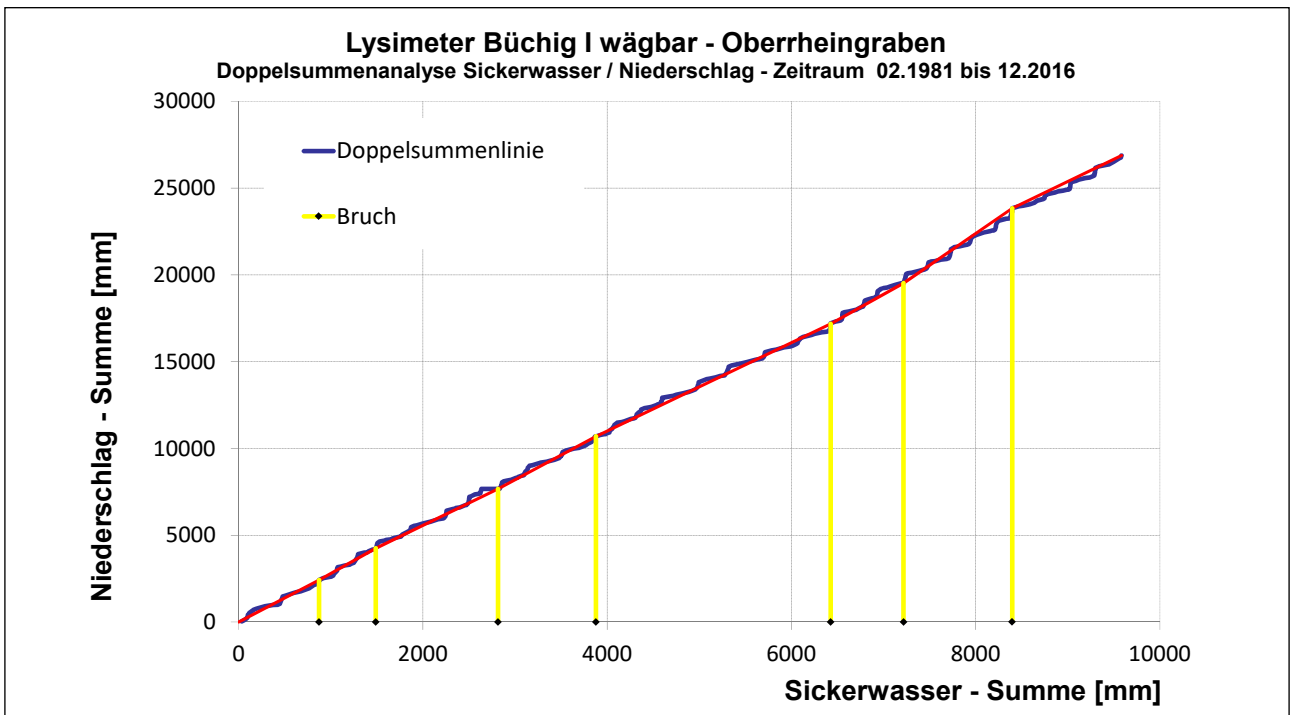
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Die Lysimeteranlage besteht aus insgesamt 6 Lysimetern. Neben diesem wägbaren Gerät werden zu Vergleichszwecken weitere 5 Lysimeter nach Friedrich-Franzen betrieben. Das Sickerverhalten ist im gesamten Beobachtungszeitraum stabil.



Eckdaten (Zeitraum 1981-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	742 mm	Sickerwasser:	258 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 35%		Sommerhalbjahr:	14%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	0,5	Maximum:	4 Wochen (1981)	
		Minimum:	0 Wochen (in 29 von 36 Jahren)	

Lysimeteranlage Büchig II

Niederschlagsmessstelle: 0402/259-2
Sickerwassermessstelle: 0503/259-1
Referenzgrundwassermessstelle: 0256/259-3

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	gestört
Bodenüberdeckung:	0,55 m	Geländehöhe:	113,51 m+NN
Bodentyp:	Sandbraunerde	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Hardtebenen	Inbetriebnahme:	01.08.1981
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 4.700 m
Mittlerer Flurabstand: 5,5 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



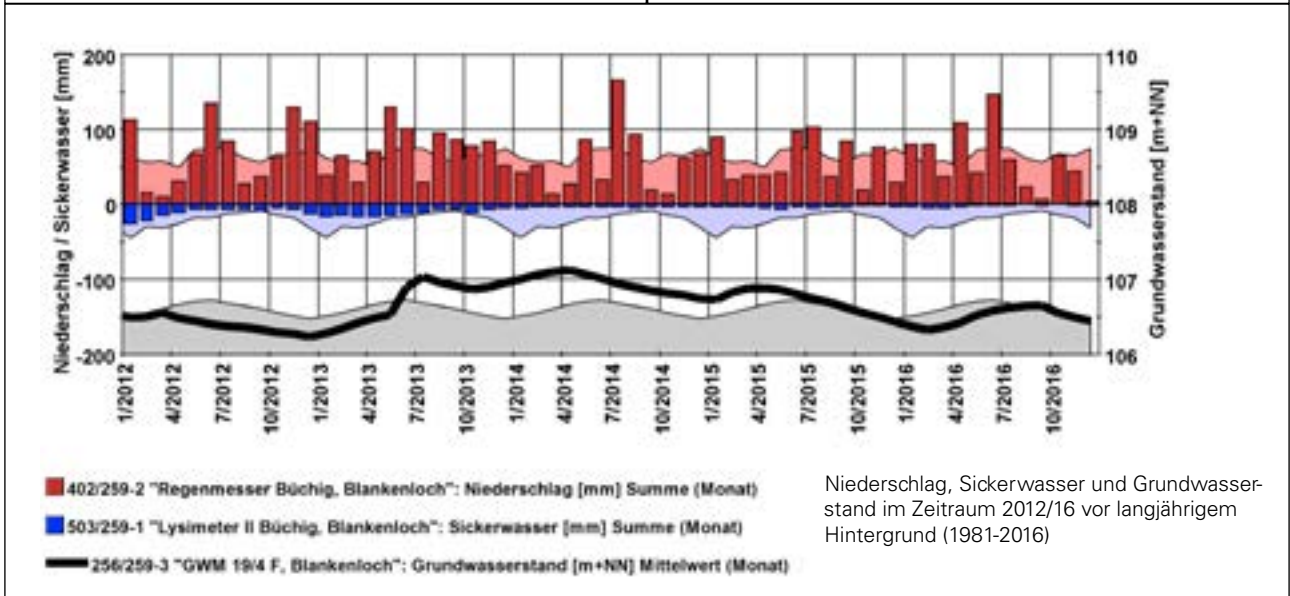
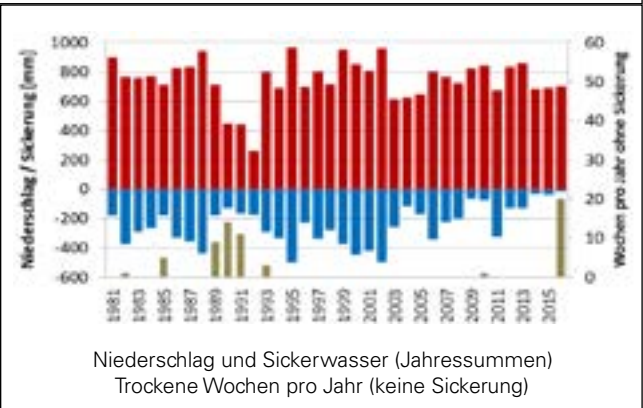
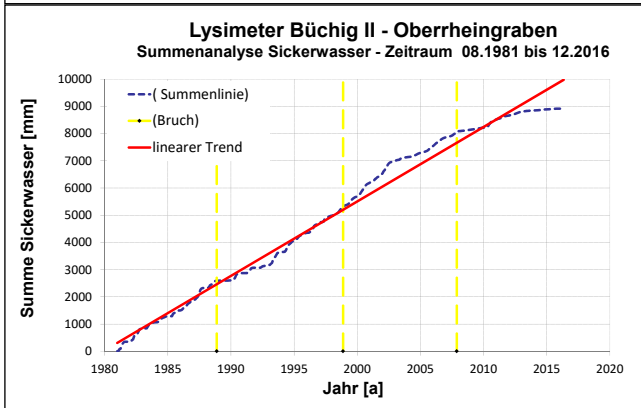
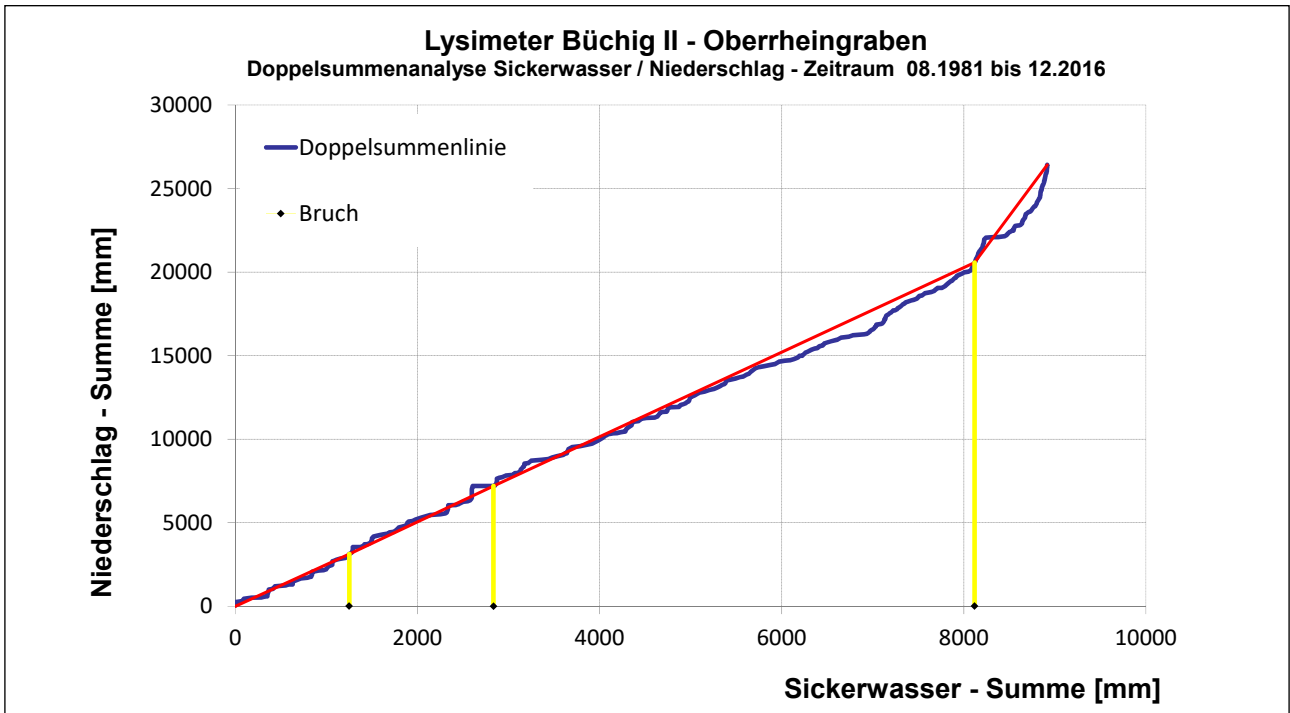
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Ab etwa 2009 sind eine Vergleichmäßigung und ein Rückgang der Sickerung zu beobachten. Der Lysimeter wurde in einem Durchgangsbereich niedergebracht und der Bodenkörper wurde in den 200er Jahren nach und nach verdichtet. 2016 geht die Sickerrate gegen Null.



Eckdaten (Zeitraum 1981-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	742 mm	Sickerwasser:	250 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 34%		Sommerhalbjahr: 20%	Winterhalbjahr: 49%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	2	Maximum: 20 Wochen (2016) Minimum: 0 Wochen (in 20 von 36 Jahren)		

Lysimeteranlage Büchig III

Niederschlagsmessstelle: 0402/259-2
Sickerwassermessstelle: 0504/259-6
Referenzgrundwassermessstelle: 0256/259-3

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	gestört
Bodenüberdeckung:	ebenerdig	Geländehöhe:	113,51 m+NN
Bodentyp:	Sandbraunerde	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Hardtebenen	Inbetriebnahme:	01.08.1981
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 4.700 m
Mittlerer Flurabstand: 5,5 m

Lage:



Übersichtskarte



Detailkarte (Lysimeter)



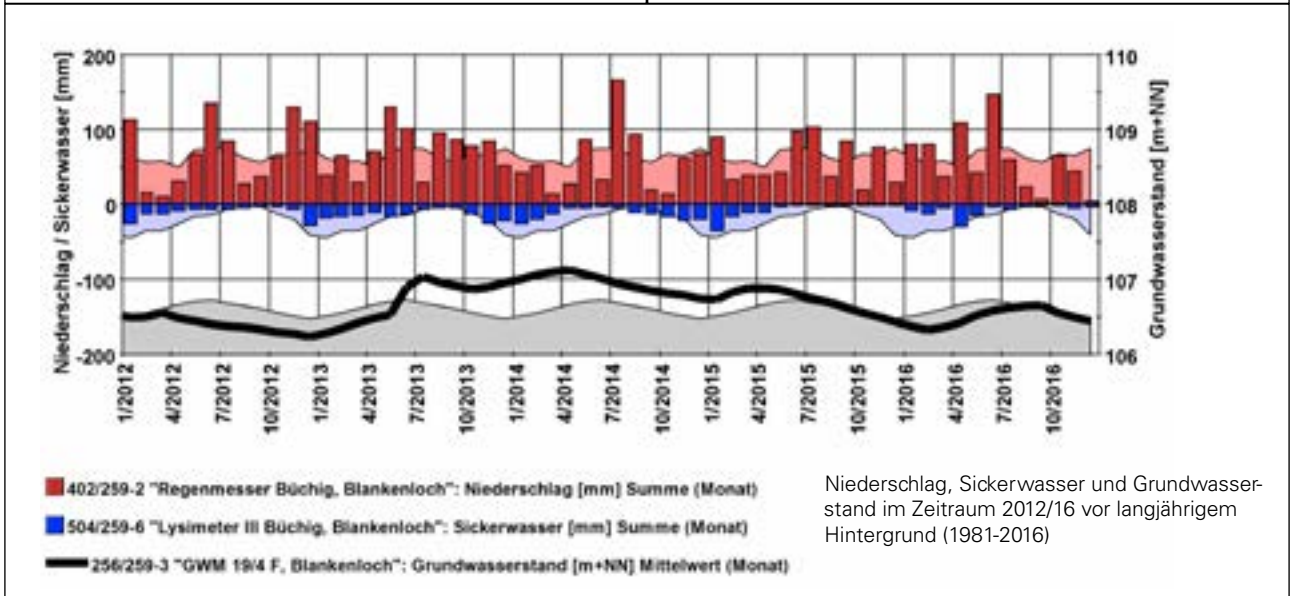
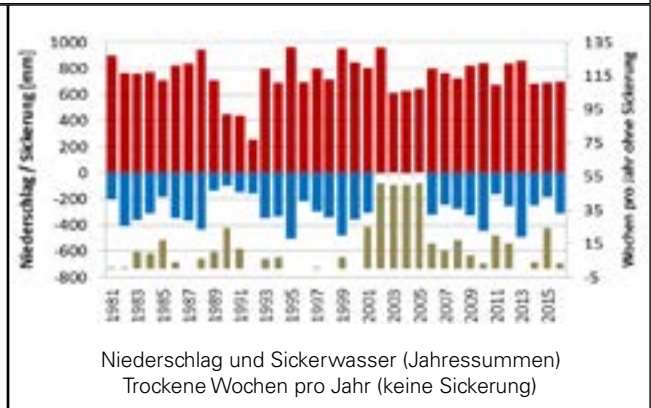
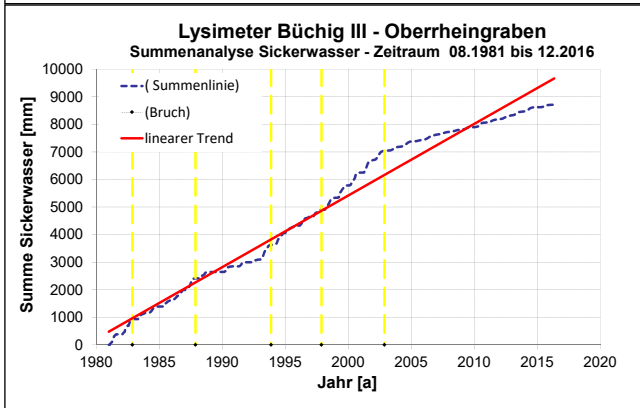
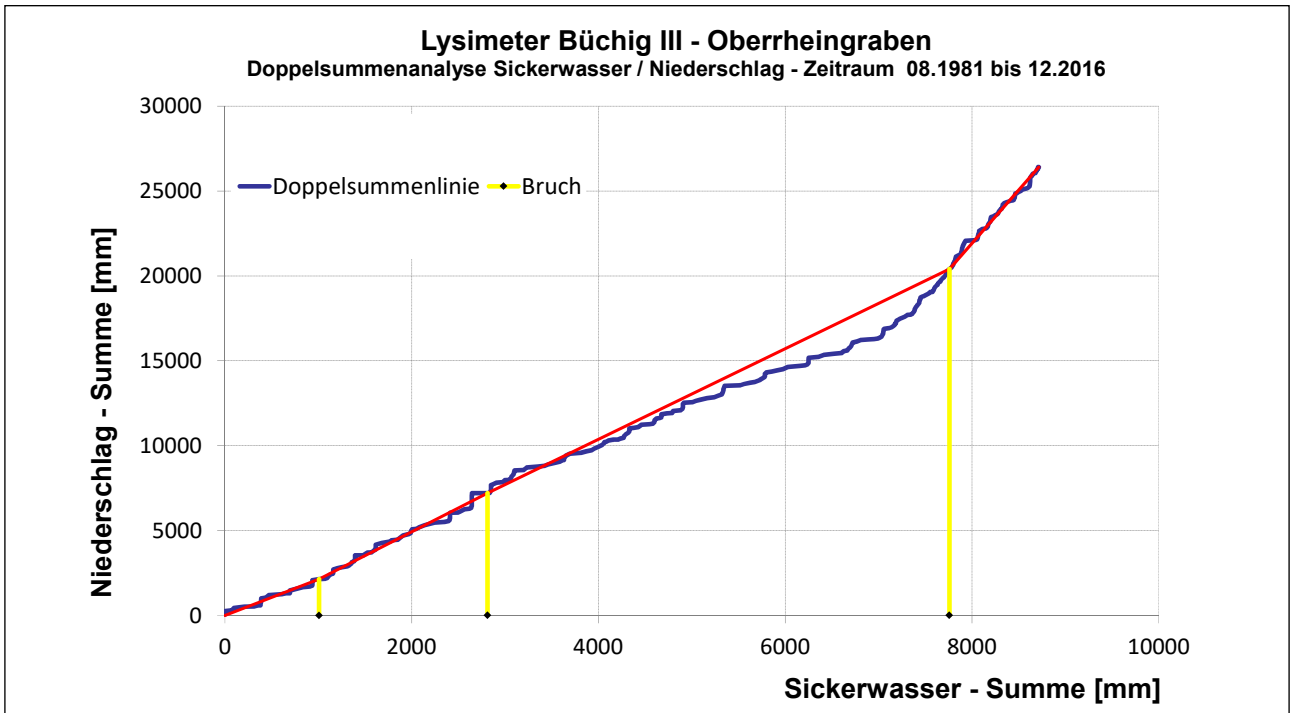
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Das Sickerverhalten ist bis etwa 2003 stabil. Seit 2004 zeichnen sich rückläufige Raten ab. Der bodenebene Lysimeter ist besonders anfällig auf Handlungen am Gelände. Der Bodenkörper wird vermutlich aufgrund von Personenverkehr (Beobachter + Besucher) sukzessive verdichtet.



Eckdaten (Zeitraum 1982-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	742 mm	Sickerwasser:	243 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 33%		Sommerhalbjahr:	Winterhalbjahr:
			13%	55%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	5	Maximum:	33 Wochen (1990)	
		Minimum:	0 Wochen (in 16 von 36 Jahren)	

Lysimeteranlage Büchig IV

Niederschlagsmessstelle: 0402/259-2
Sickerwassermessstelle: 0505/259-0
Referenzgrundwassermessstelle: 0256/259-3

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	Monolith (ungestört)
Bodenüberdeckung:	ebenerdig	Geländehöhe:	113,51 m+NN
Bodentyp:	Sandbraunerde	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Hardtebenen	Inbetriebnahme:	01.08.1981
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 4.700 m
Mittlerer Flurabstand: 5,5 m

Lage:



Übersichtskarte



Detailkarte (Lysimeter)



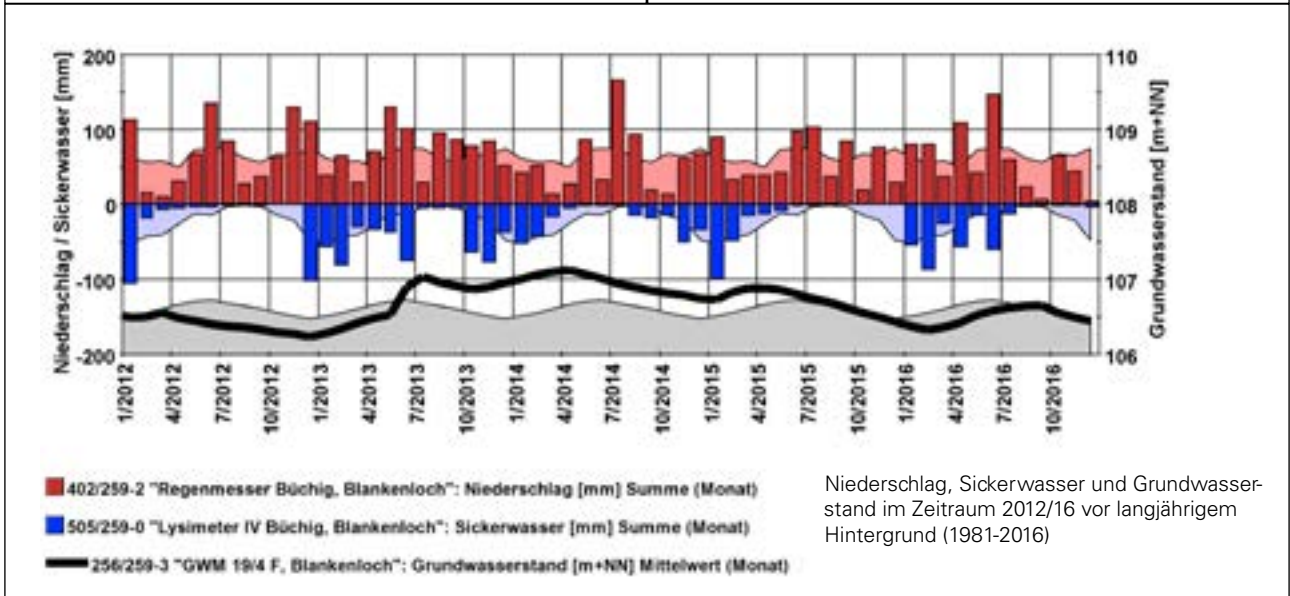
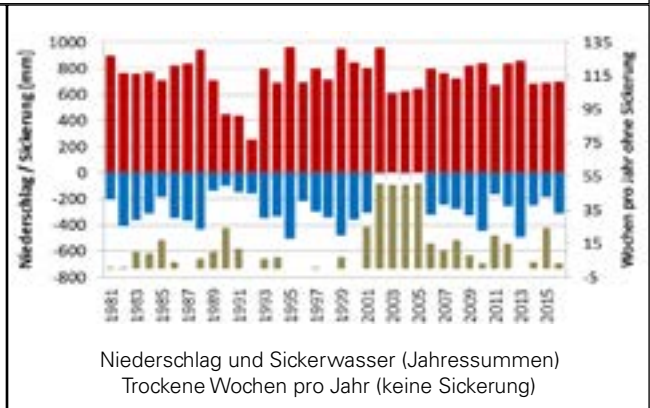
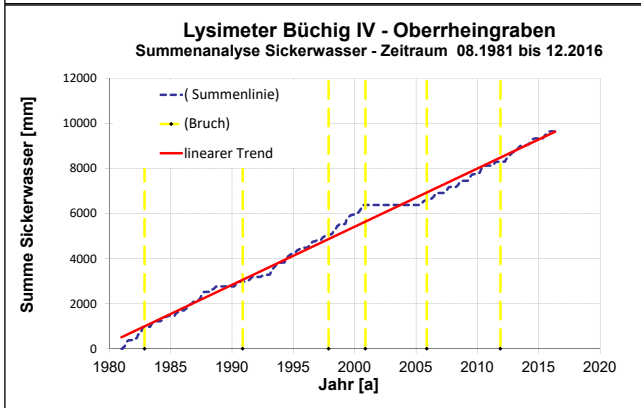
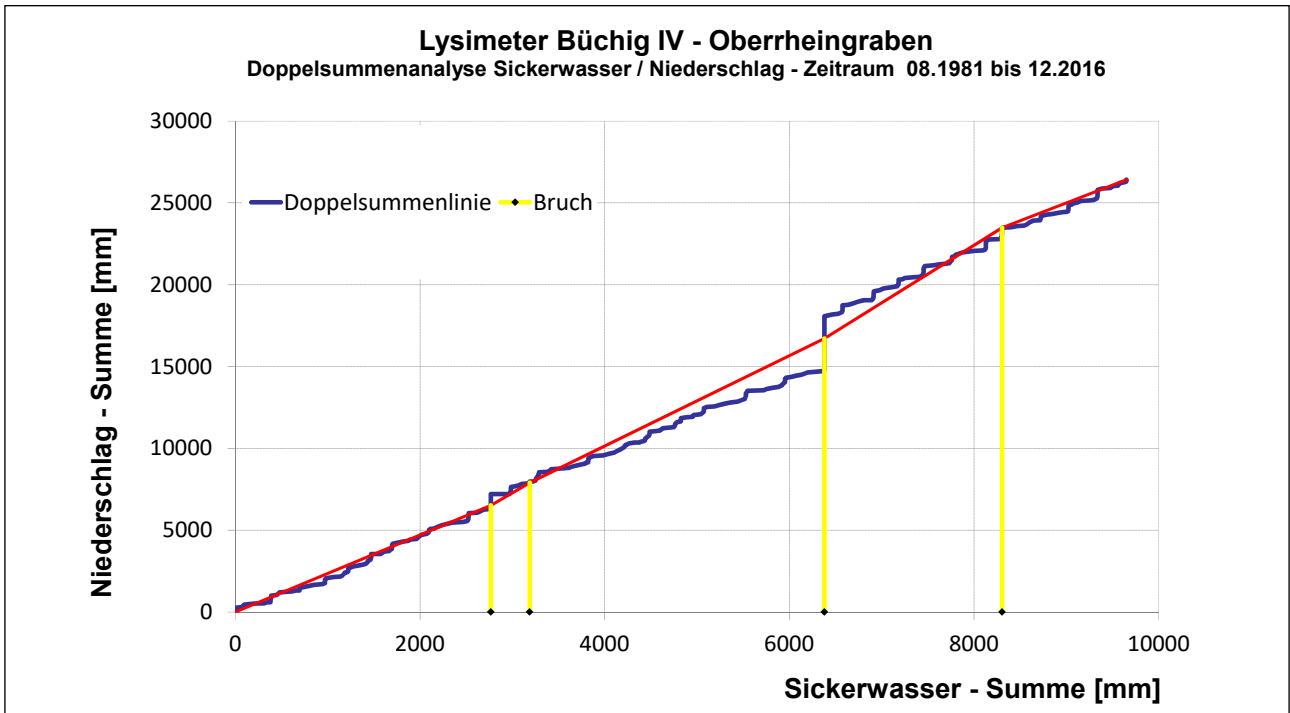
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Die Lysimeteranlage besteht aus insgesamt 6 Lysimetern. Neben diesem Gerät werden zu Vergleichszwecken weitere 4 Lysimeter nach Friedrich-Franzen und eine wägbare betrieben. Die Messstelle war von 2001 bis 2005 trocken und wurde mittels Rückspülung saniert.



Eckdaten (Zeitraum 1982-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	742 mm	Sickerwasser:	270 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 36%		Sommerhalbjahr:	Winterhalbjahr:
			12%	64%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	13	Maximum:	51 Wochen (2002 -> 2005)	
		Minimum:	0 Wochen (in 8 von 36 Jahren)	

Lysimeteranlage Büchig V

Niederschlagsmessstelle: 0402/259-2
Sickerwassermessstelle: 0506/259-5
Referenzgrundwassermessstelle: 0256/259-3

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	gestört
Bodenüberdeckung:	0,50 m	Geländehöhe:	113,51 m+NN
Bodentyp:	Sandbraunerde	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Hardtebenen	Inbetriebnahme:	01.08.1981
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 4.700 m
Mittlerer Flurabstand: 5,5 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



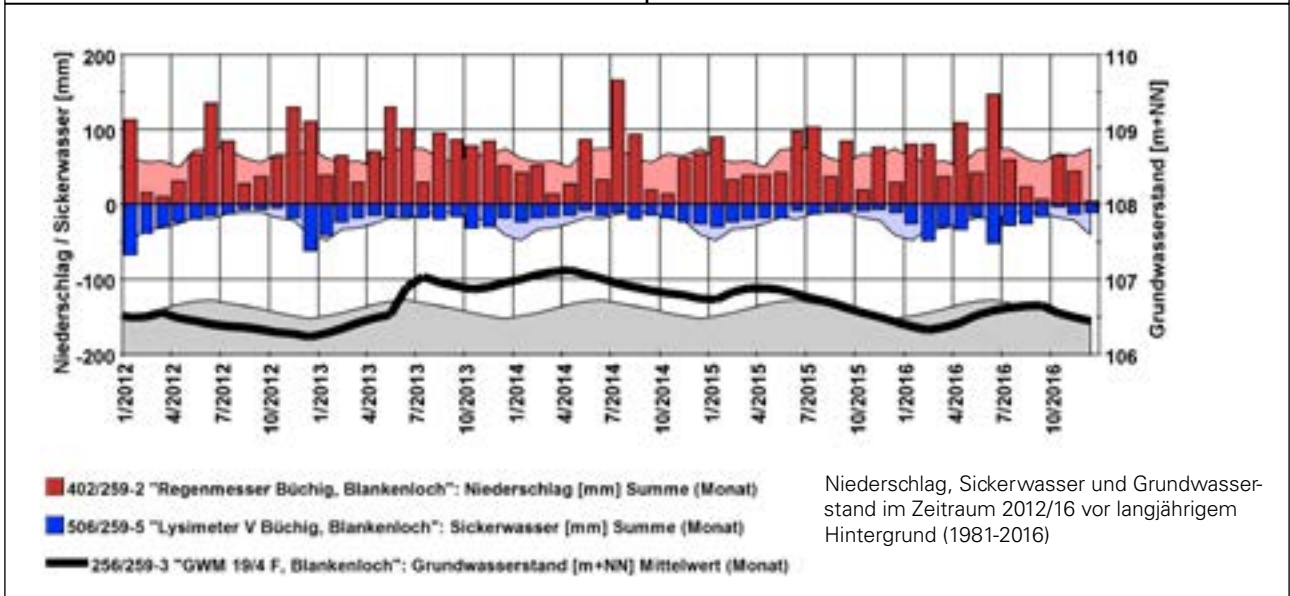
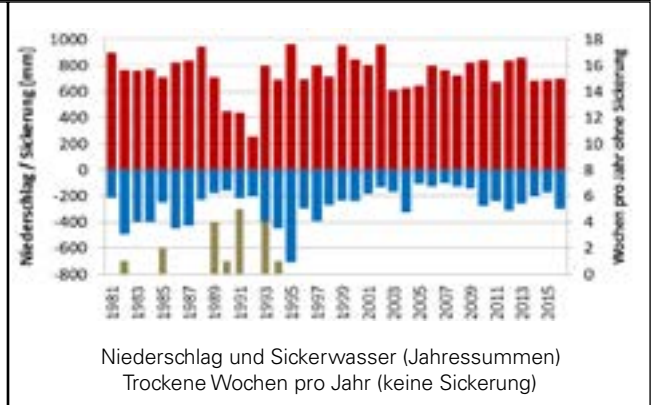
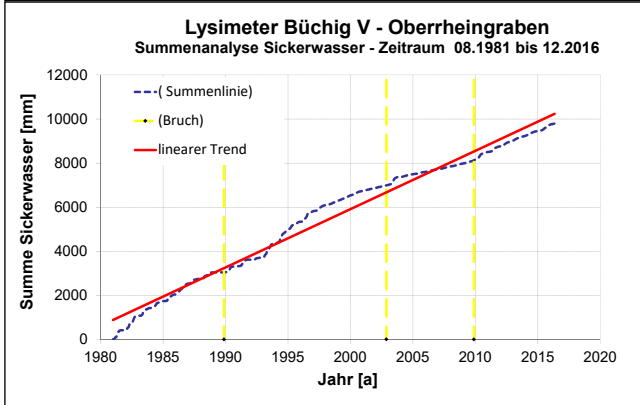
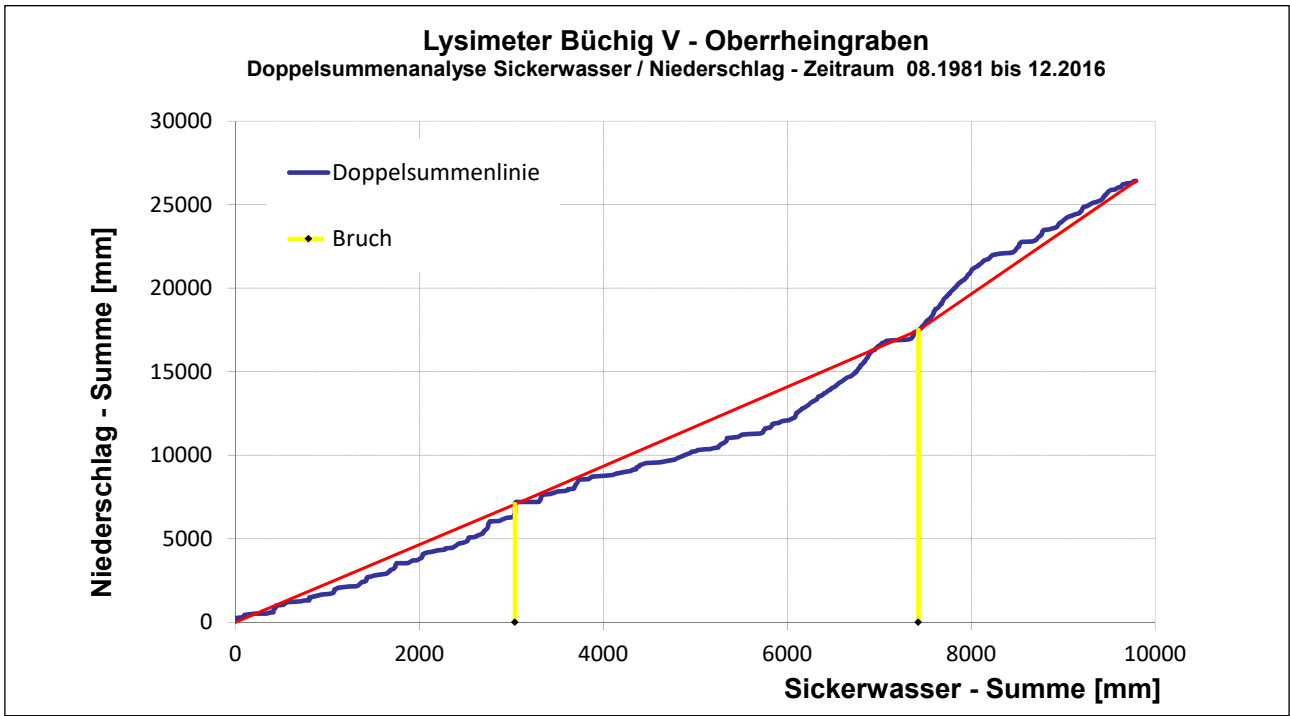
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Die Lysimeteranlage besteht aus insgesamt 6 Lysimetern. Neben diesem Gerät werden zu Vergleichszwecken weitere 4 Lysimeter nach Friedrich-Franzen und eine wägbares betrieben. Ursache für die saisonal vergleichsweise wenig schwankende Versickerung seit 2010 sind Spurrillen von Baufahrzeugen (Wasserpfützen) sowie Maulwurfaktivitäten im Lysimeterbereich.



Eckdaten (Zeitraum 1982-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	742 mm	Sickerwasser:	274 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 37%		Sommerhalbjahr:	Winterhalbjahr:
			21%	55%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	1	Maximum:	5 Wochen (1991)	
		Minimum:	0 Wochen (in 30 von 36 Jahren)	

Lysimeteranlage Büchig VI

Niederschlagsmessstelle: 0402/259-2
 Sickerwassermessstelle: 0507/259-0
 Referenzgrundwassermessstelle: 0256/259-3

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	Monolith (ungestört)
Bodenüberdeckung:	0,48 m	Geländehöhe:	113,51 m+NN
Bodentyp:	Sandbraunerde	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Hardtebenen	Inbetriebnahme:	01.08.1981
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann mit Windschutz
 Entfernung GW-Messstelle: 4.700 m
 Mittlerer Flurabstand: 5,5 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



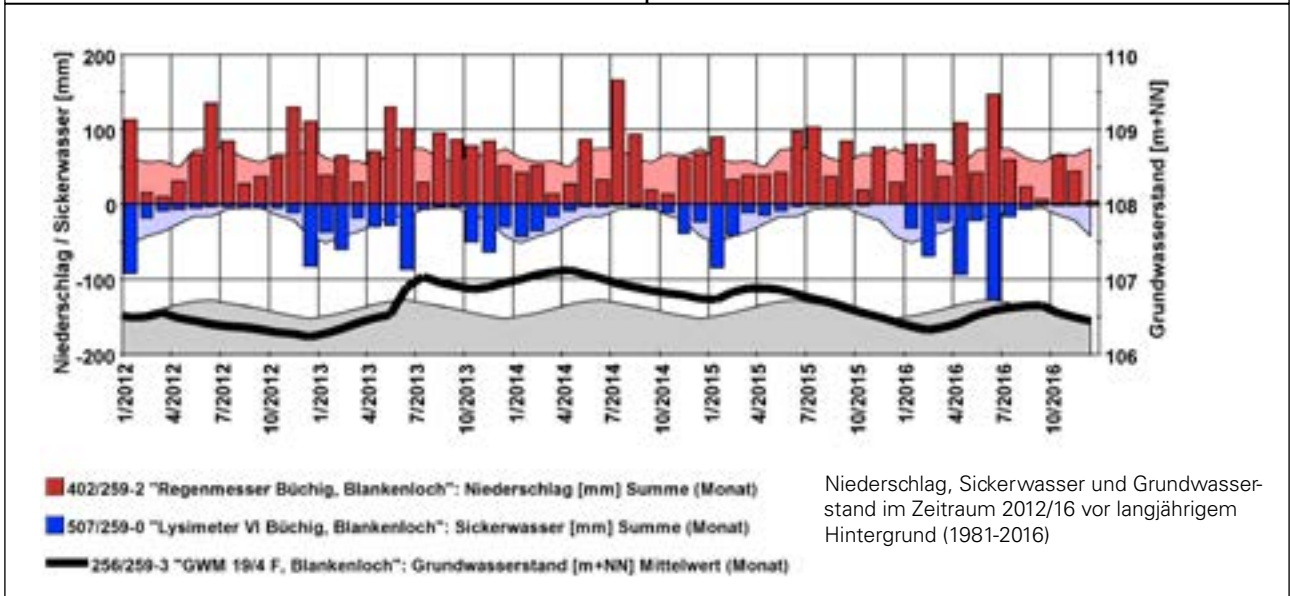
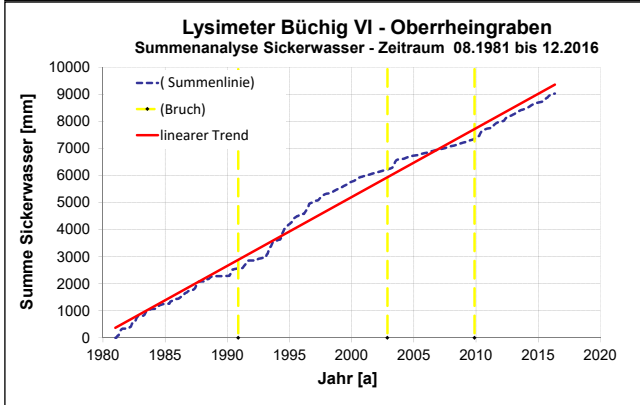
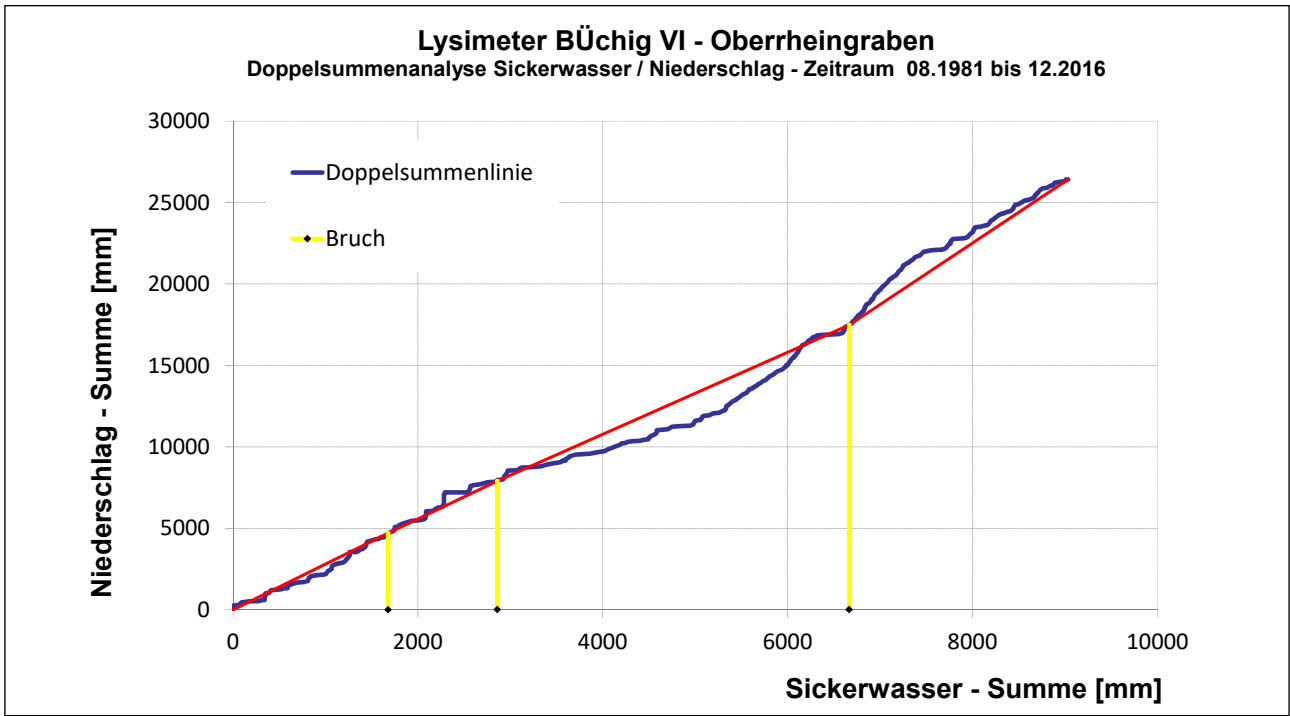
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Die Lysimeteranlage besteht aus insgesamt 6 Lysimetern. Ursachen für die erhöhten Versickerungsraten ab 2016 sind eine von einem Baustellenfahrzeug hergestellte Spurrille sowie Maulwurfaktivitäten im Lysimeterbereich (siehe auch Messstellenbild der Anlage Büchig V).



Eckdaten (Zeitraum 1982-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	742 mm	Sickerwasser:	268 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 36%		Sommerhalbjahr: 14%	Winterhalbjahr: 61%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	2	Maximum: 18 Wochen (2015)	Minimum: 0 Wochen (in 21 von 36 Jahren)	

Lysimeteranlage Buggingen - stillgelegt

Niederschlagsmessstelle: 0400/021-0
 Sickerwassermessstelle: 0500/021-1
 Referenzgrundwassermessstelle: 0133/021-6

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	vermutlich Monolith
Bodenüberdeckung:	rd 0,50 m	Geländehöhe:	222,5 m+NN
Bodentyp:	Lehmiger Kies	Landnutzung:	Ackerland
Naturraum:	Markgräfler Land	Inbetriebnahme:	01.04.1971
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande	Stilllegung:	31.01.2009

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann
 Entfernung GW-Messstelle: 1.920 m
 Mittlerer Flurabstand: 18 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



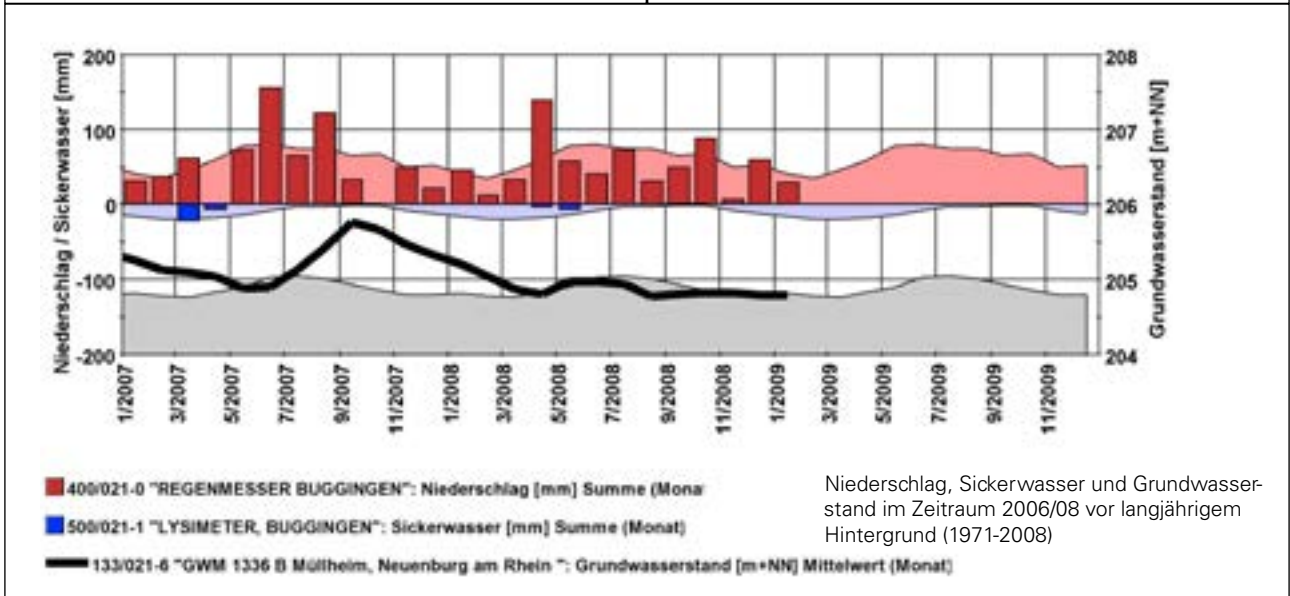
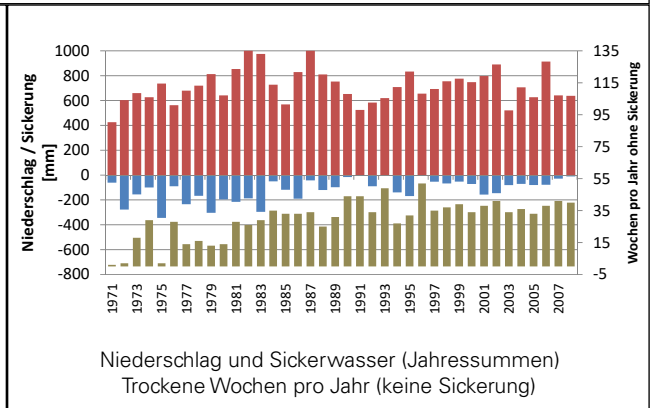
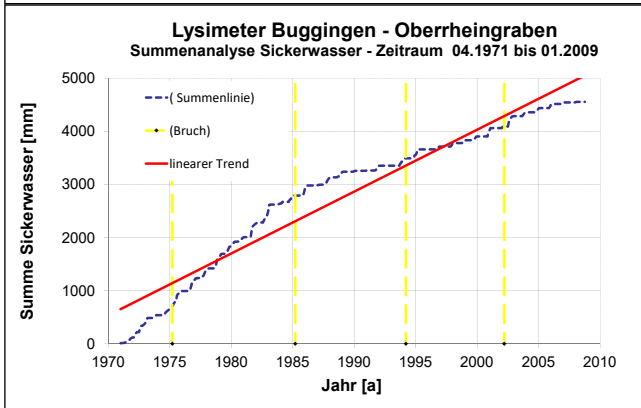
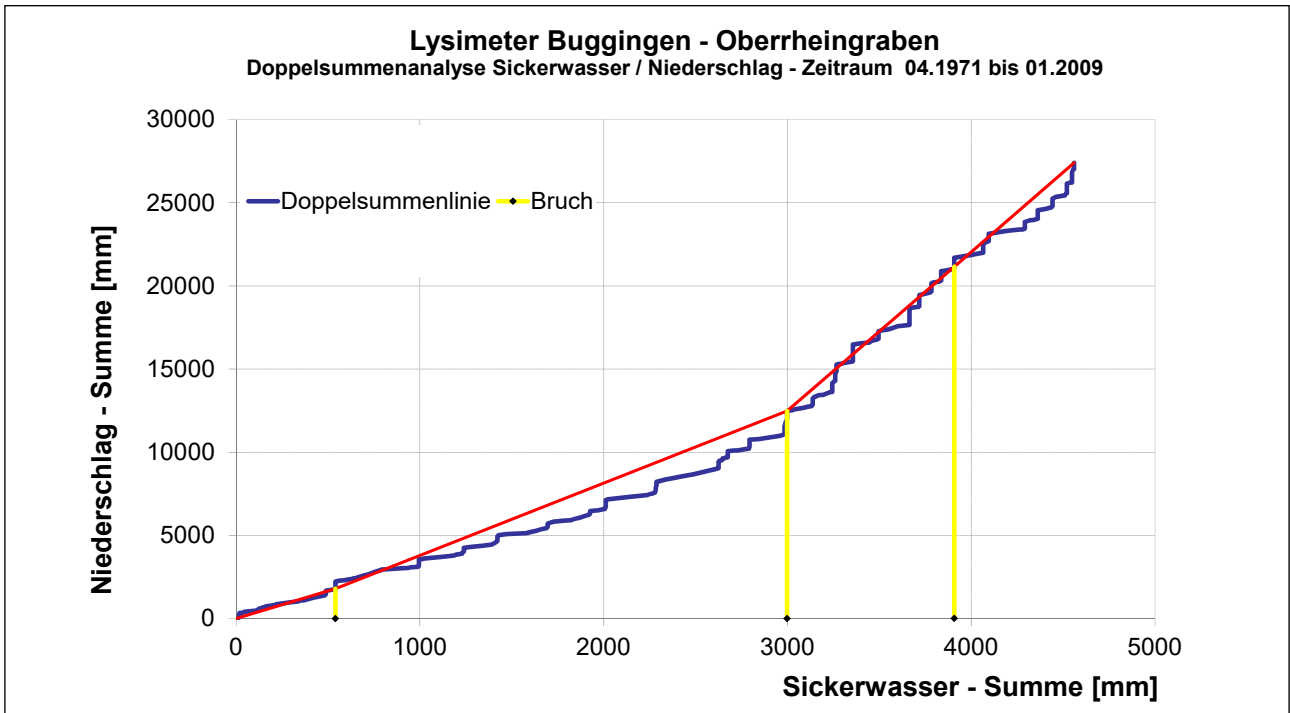
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Das Gerät steht im Regenschatten westlich gelegener Bäume. Die Bodenverdichtung infolge des Einsatzes schwerer Landmaschinen ab den 1980er Jahren hat zu einer allmählichen Verminderung der Versickerung geführt.



Eckdaten (Zeitraum 1972-2008)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	729 mm	Sickerwasser:	122 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 17%		Sommerhalbjahr:	7%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	31	Maximum:	52 Wochen (1996)	
		Minimum:	2 Wochen (1972, 1975)	

Lysimeteranlage Durmersheim

Niederschlagsmessstelle: 0403/210-9
Sickerwassermessstelle: 0503/210-4
Referenzgrundwassermessstelle: 0110/210-0

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	Monolith (ungestört)
Bodenüberdeckung:	ebenerdig	Geländehöhe:	118,25 m+NN
Bodentyp:	Kiesiger Sand	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Hardtebenen	Inbetriebnahme:	01.05.1968
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann ohne Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 2.900 m
Mittlerer Flurabstand: 9 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



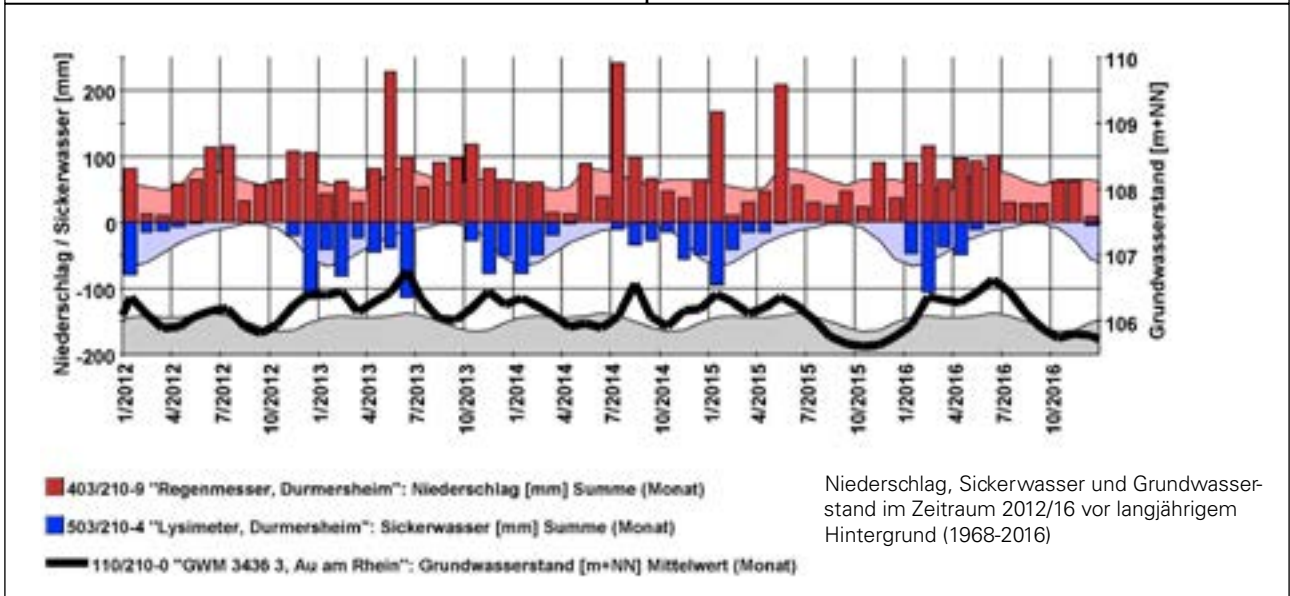
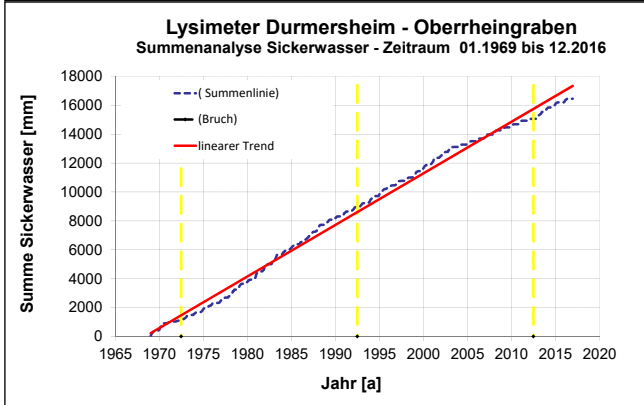
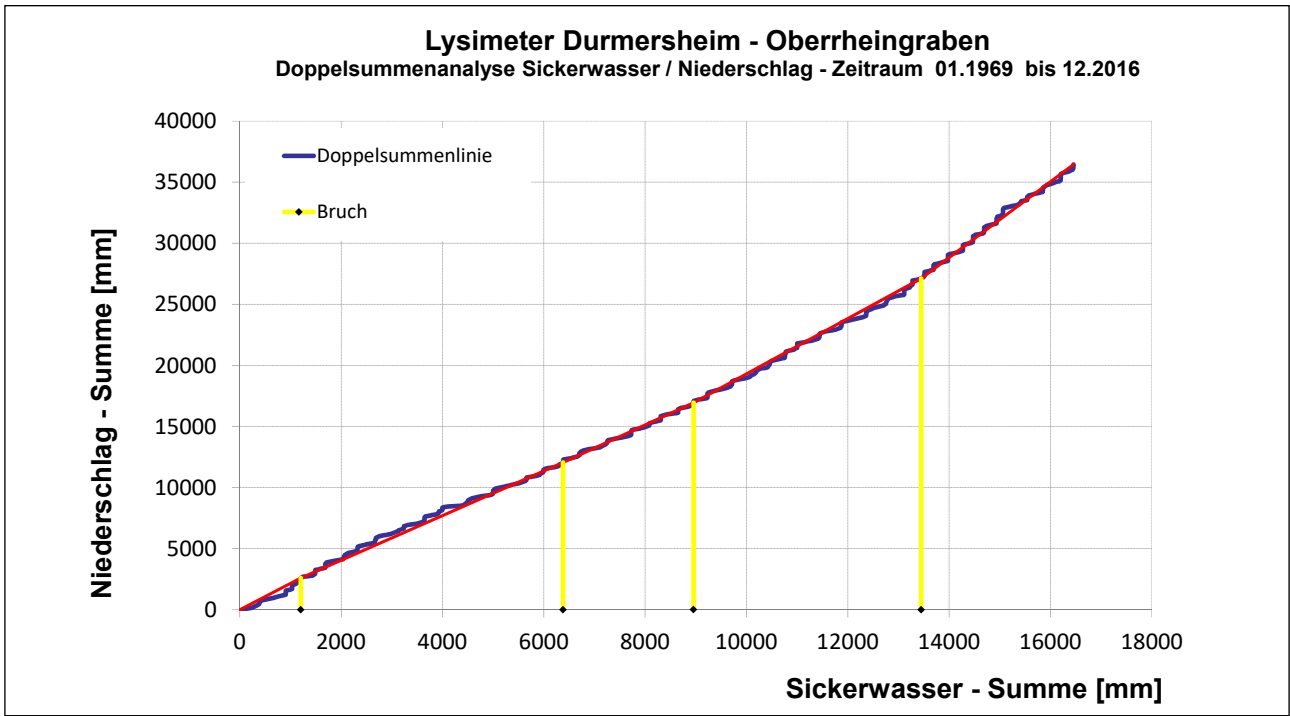
Orthophoto



Messstellenbild vom Einbau am 23.04.1968 (Quelle: unbekannt)

Bemerkung:

Die Lysimeteranlage Durmersheim wurde auf einem Wasserwerkgelände eingerichtet. Der Versickerungsanteil fällt in trockenen Zeiträumen besonders gering aus (z.B. in den 1970er Jahre und nach 2003).



Eckdaten (Zeitraum 1969-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	948 mm	Sickerwasser:	485 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 51%		Sommerhalbjahr:	29%
			Winterhalbjahr:	88%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	12	Maximum:	28 Wochen (2007, 2011, 2015)	
		Minimum:	0 Wochen (in 6 von 49 Jahren)	

Lysimeteranlage Egelsee / Bohrlysimeter - stillgelegt

Niederschlagsmessstelle: 0403/769-4
Sickerwassermessstelle: 0503/769-9
Referenzgrundwassermessstelle: 0150/769-7

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Bohrlysimeter	Bodenkörper:	ungestört
Bodenüberdeckung:	unbekannt	Geländehöhe:	577,49 m+NN
Bodentyp:	Lehm über Kies	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Holzstöcke	Inbetriebnahme:	01.01.1977
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande	Stilllegung:	30.06.1987

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 1.080 m
Mittlerer Flurabstand: 10,1 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



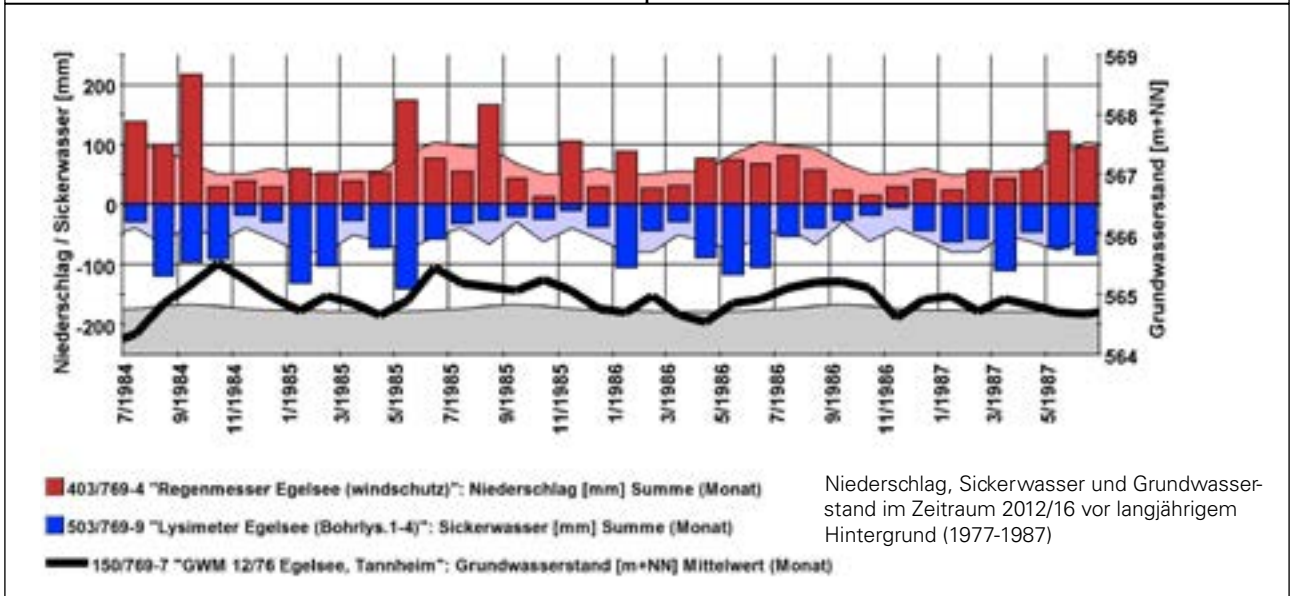
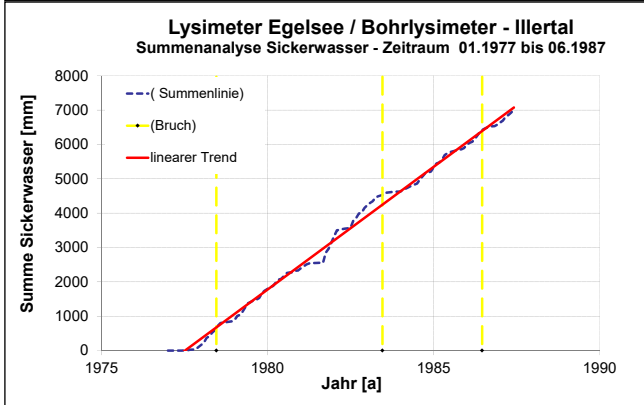
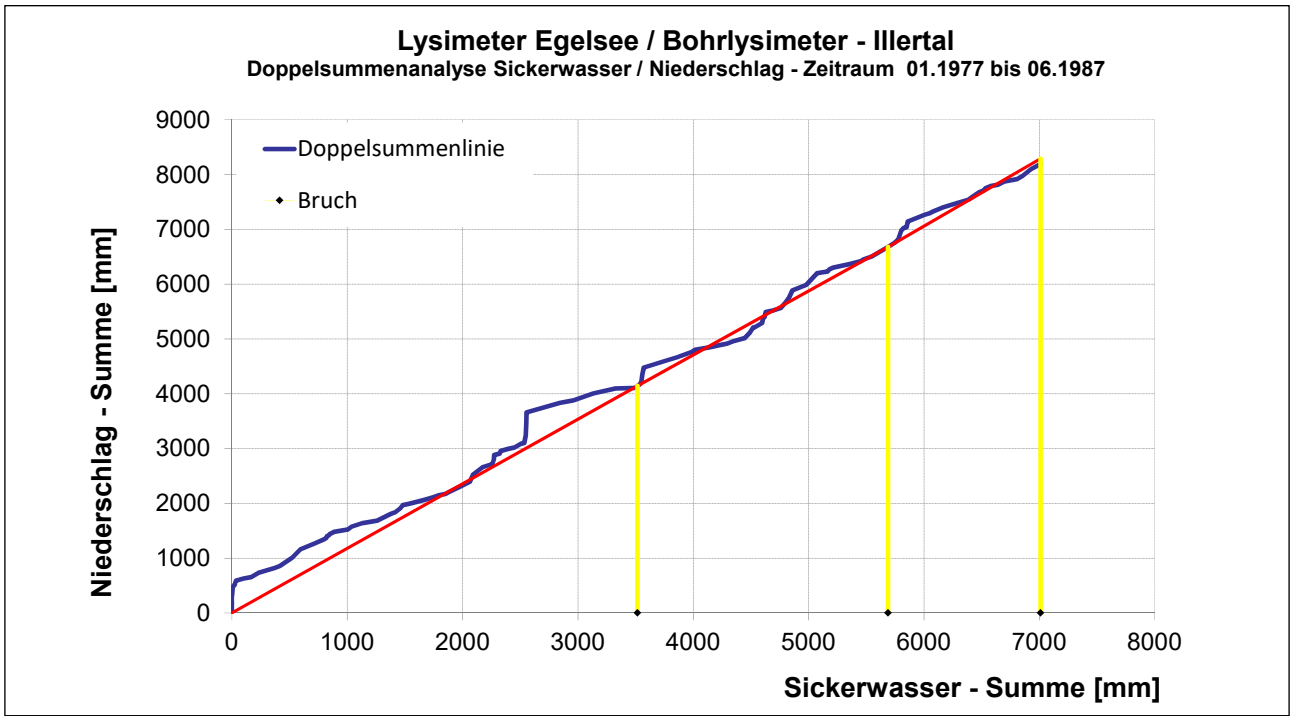
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: RP Tübingen)

Bemerkung:

Das Bohrlysimeter wurde nach rd. 10 Betriebsjahren aufgegeben aufgrund von deutlich zu hohen Versickerungsraten.



Eckdaten (Zeitraum 1977-1987)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	816 mm	Sickerwasser:	701 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 86%		Sommerhalbjahr: 63%	Winterhalbjahr: 135%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	1	Maximum: 6 Wochen (1983) Minimum: 0 Wochen (in 8 von 11 Jahren)		

Lysimeteranlage Egelsee / Friedrich-Franzen

Niederschlagsmessstelle: 0403/769-4
 Sickerwassermessstelle: 0502/769-4
 Referenzgrundwassermessstelle: 0150/769-7

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	ungestört (Monolith)
Bodenüberdeckung:	0,05 cm	Geländehöhe:	577,49 m+NN
Bodentyp:	Lehm über Kies	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Holzstöcke	Inbetriebnahme:	01.05.1976
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann mit Windschutz
 Entfernung GW-Messstelle: 1.080 m
 Mittlerer Flurabstand: 10,1 m

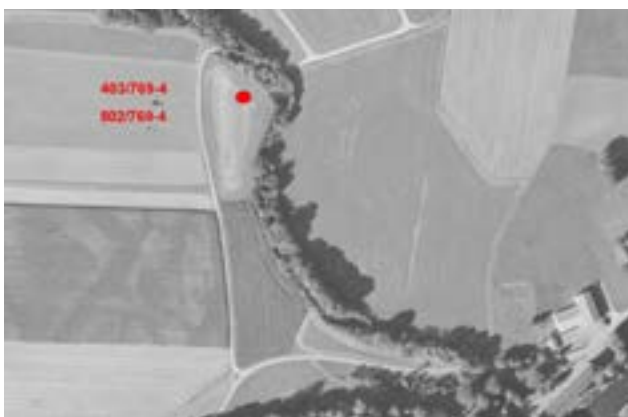
Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



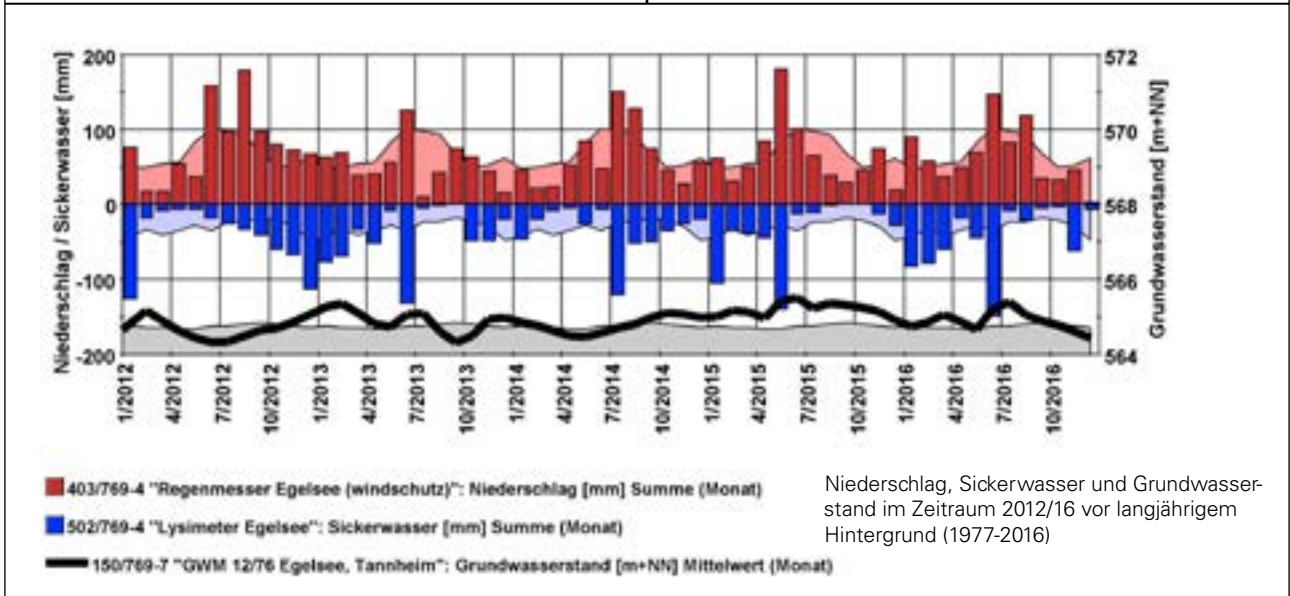
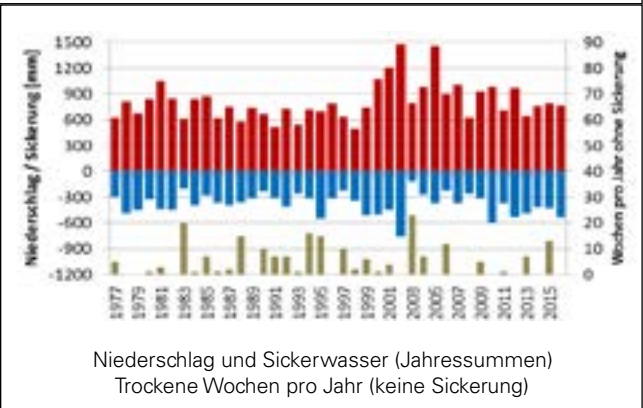
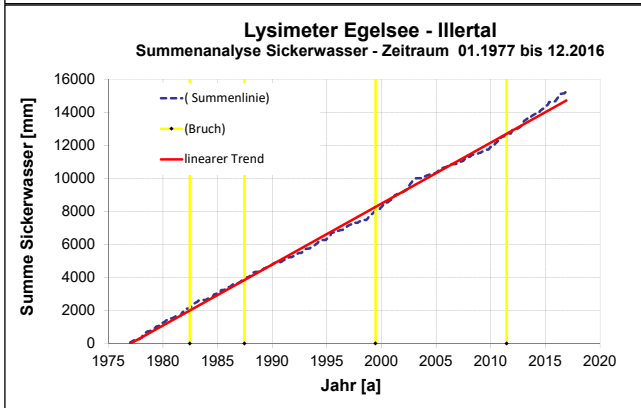
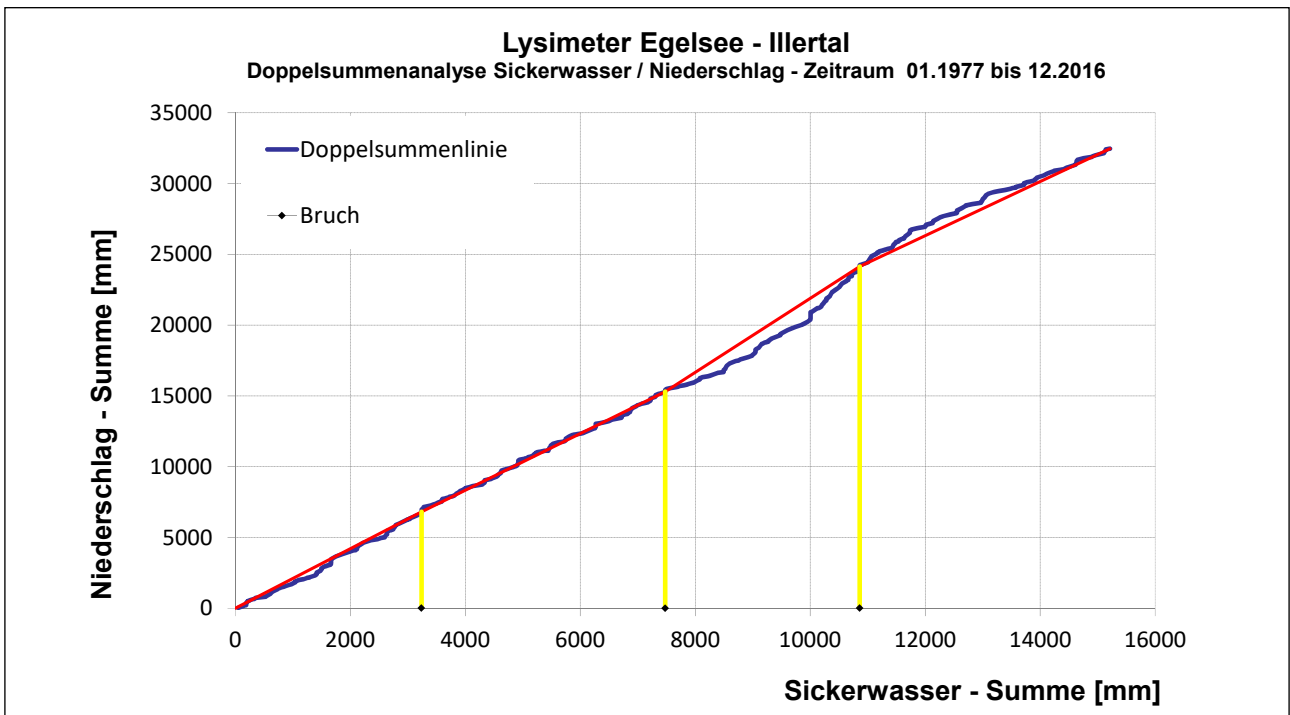
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: RP Tübingen)

Bemerkung:

Die Lysimeteranlage besteht aus insgesamt 3 Lysimetern und 2 Regenmessern. Neben diesem Standardlysimeter wurden in den 1970er Jahre ein Bohrlysimeter und ein Lysimeter nach Schendel betrieben. Die beiden Anlagen wurden aufgrund unzuverlässiger Daten stillgelegt



Eckdaten (Zeitraum 1977-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	812 mm	Sickerwasser:	380 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 47%		Sommerhalbjahr:	31%
			Winterhalbjahr:	72%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	5	Maximum:	23 Wochen (2003)	
		Minimum:	0 Wochen (in 15 von 49 Jahren)	

Lysimeteranlage Elgersweier

Niederschlagsmessstelle: 0400/115-1
Sickerwassermessstelle: 0500/115-4
Referenzgrundwassermessstelle: 0131/115-0

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	Monolith
Bodenüberdeckung:	ca. 0,20 m	Geländehöhe:	ca. 155,8 m+NN
Bodentyp:	Kiesig-schluffiger Sand	Landnutzung:	Streuobstwiese
Naturraum:	Offenburger Rheinebene	Inbetriebnahme:	01.05.1974
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann ohne Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 1.850 m
Mittlerer Flurabstand: 0,7 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



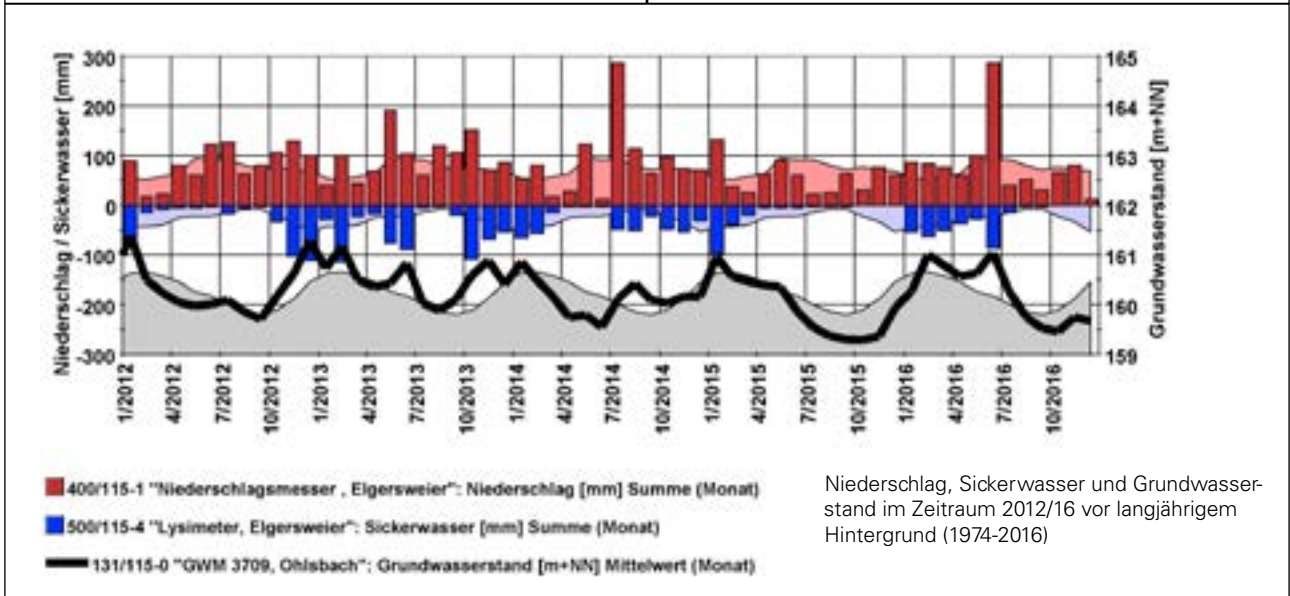
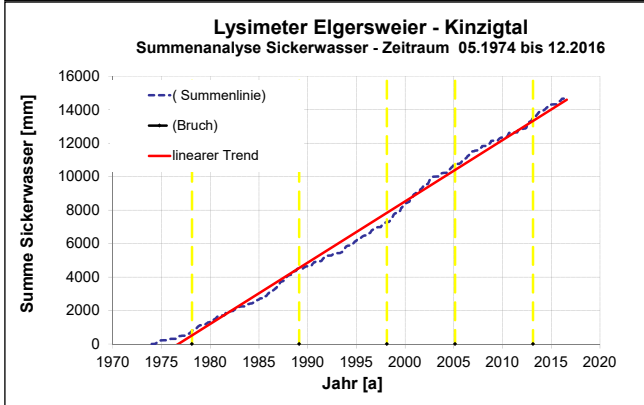
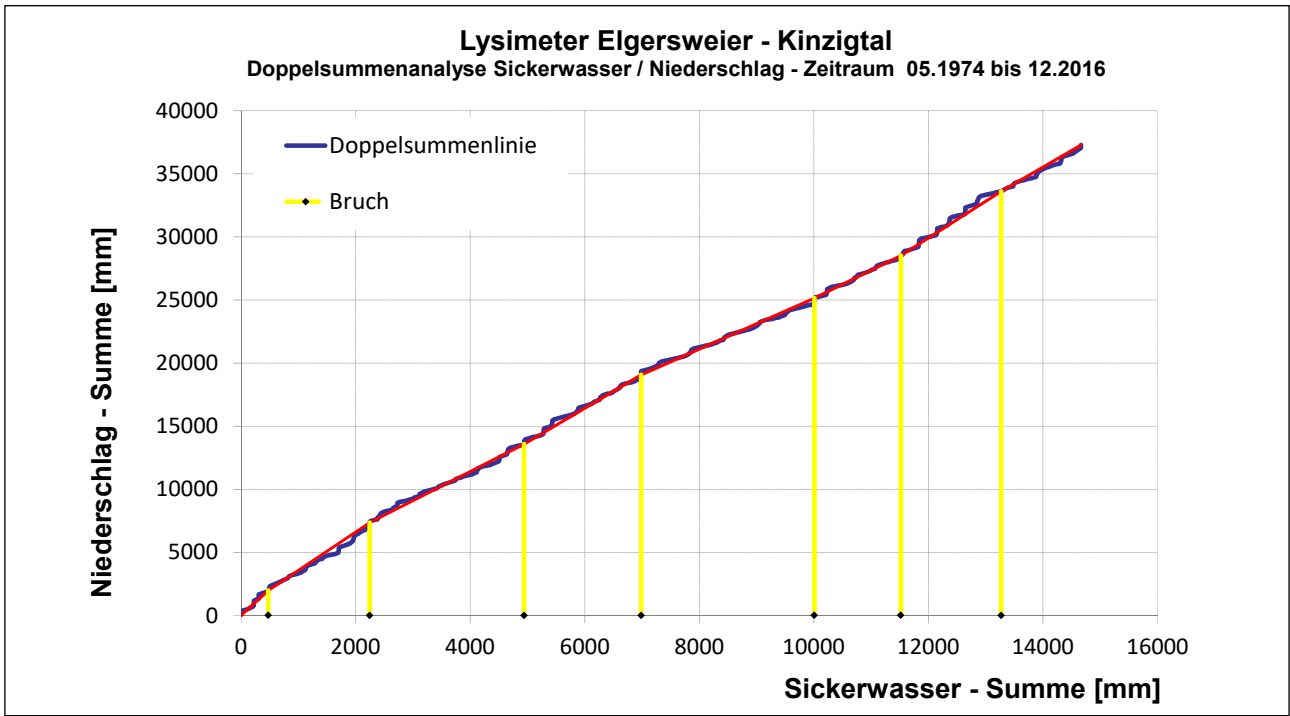
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Bei Kinzighochwasser reichte das Grundwasser bis über den Auffangbehälter. Zur Vermeidung der Überflutung wurde im Dezember 1987 ein Aufsatzring auf den Sickerschacht geschweißt.



Eckdaten (Zeitraum 1974-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	875 mm	Sickerwasser:	346 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 40%		Sommerhalbjahr: 20%	Winterhalbjahr: 66%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	2	Maximum: 21 Wochen (1976) Minimum: 0 Wochen (in 20 von 43 Jahren)		

Lysimeteranlage Friedrichstal

Niederschlagsmessstelle: 0400/259-1
Sickerwassermessstelle: 0500/259-8
Referenzgrundwassermessstelle: 0256/259-3

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	Monolith (ungestört)
Bodenüberdeckung:	0,41	Geländehöhe:	111,57 m+NN
Bodentyp:	Kiesige Sandbraunerde	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Hardtebenen	Inbetriebnahme:	01.11.1963
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann, seit 1986 mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 3.370 m
Mittlerer Flurabstand: 6 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



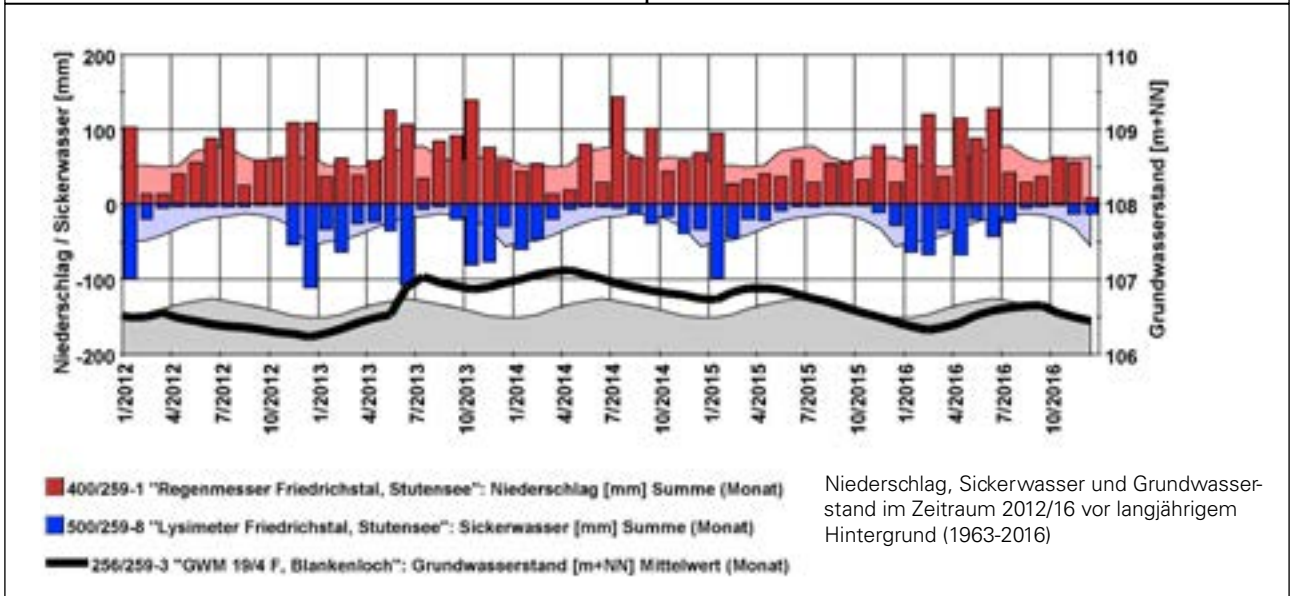
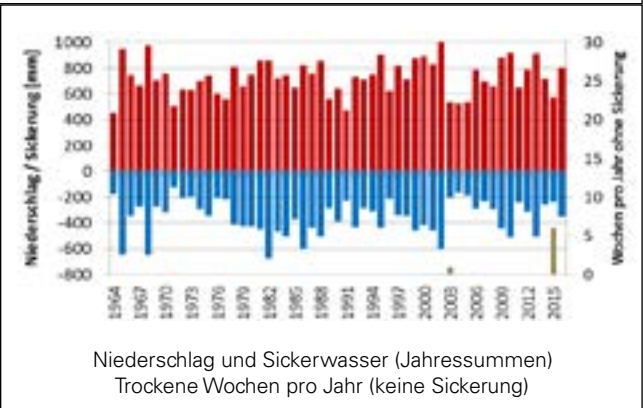
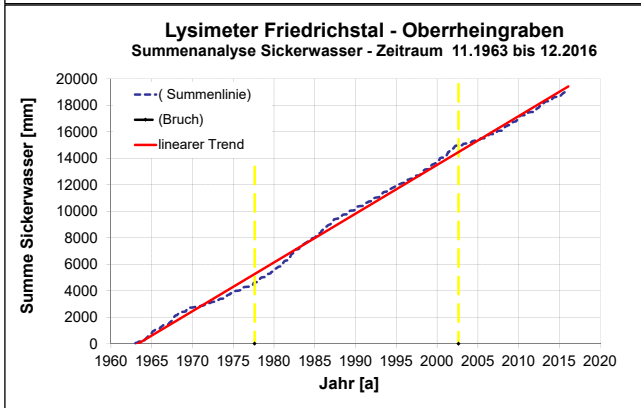
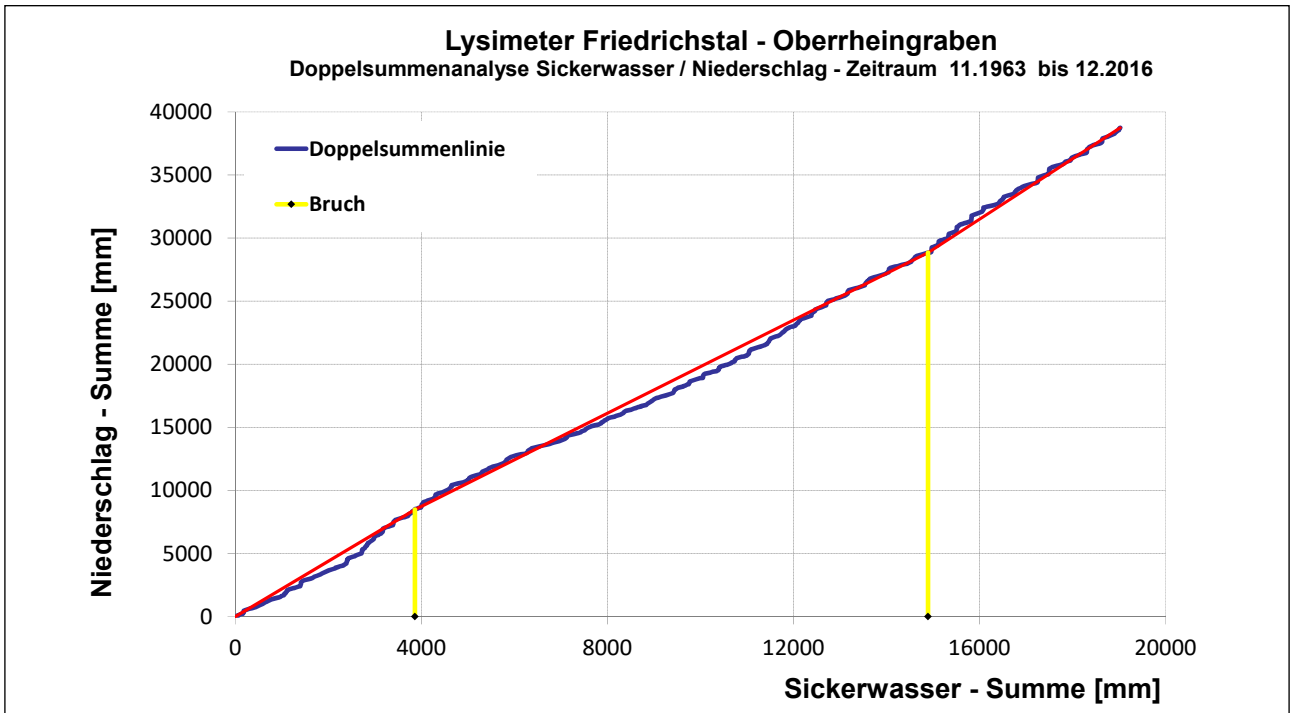
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Die Lysimeteranlage Friedrichstal befindet sich auf Wasserwerksgelände. Die hohen Versickerungsraten lassen sich durch sehr gut durchlässige Bodenverhältnisse erklären



Eckdaten (Zeitraum 1963-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	729 mm	Sickerwasser:	358 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 49%		Sommerhalbjahr: 26%	Winterhalbjahr: 77%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	0	Maximum: 6 Wochen (2015) Minimum: 0 Wochen (in 52 von 53 Jahren)		

Lysimeteranlage Friesenhofen

Niederschlagsmessstelle: 0400/772-2

Sickerwassermessstelle: 0500/772-0

Referenzgrundwassermessstelle: 0164/772-6

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	ungestört (Monolith)
Bodenüberdeckung:	ebenerdig	Geländehöhe:	705,75 m+NN
Bodentyp:	Schluff über Sand und Kies	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Donau-Ablach-Platten	Inbetriebnahme:	01.07.1977
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp:	Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle:	70 m
Mittlerer Flurabstand:	25 m

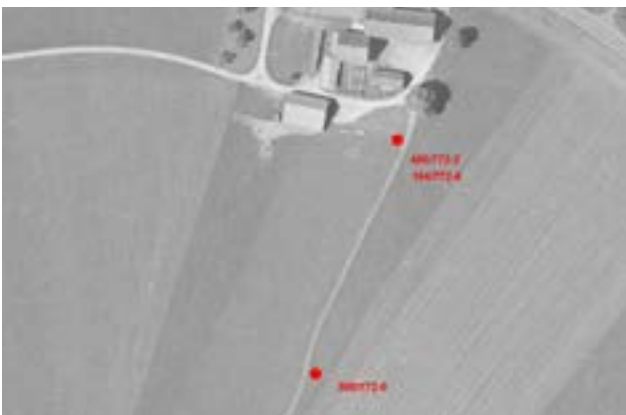
Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



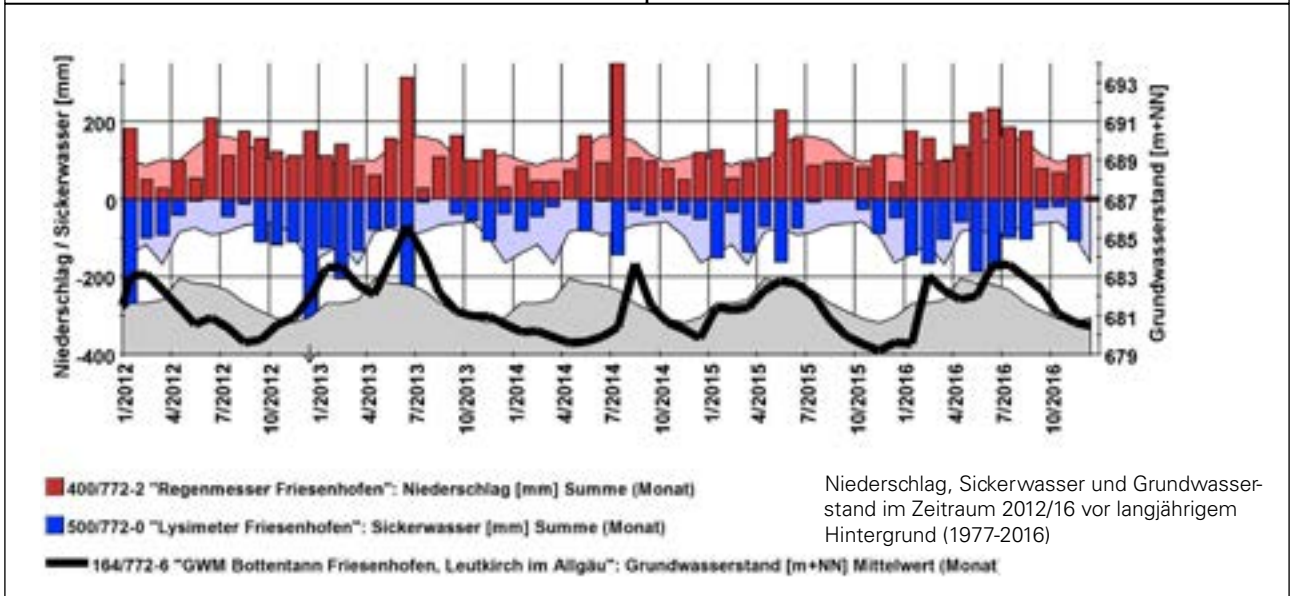
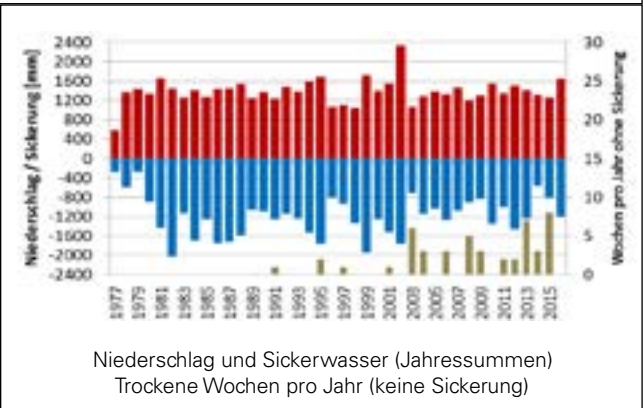
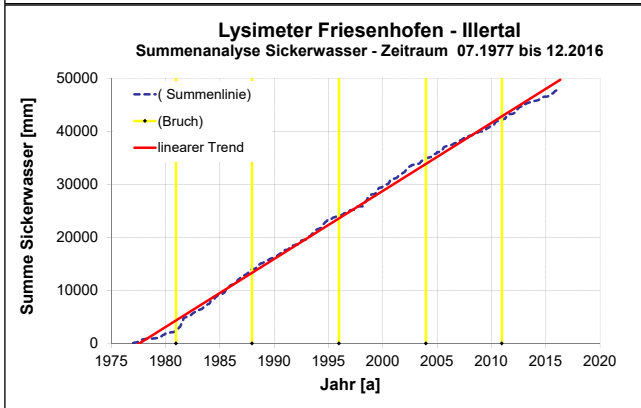
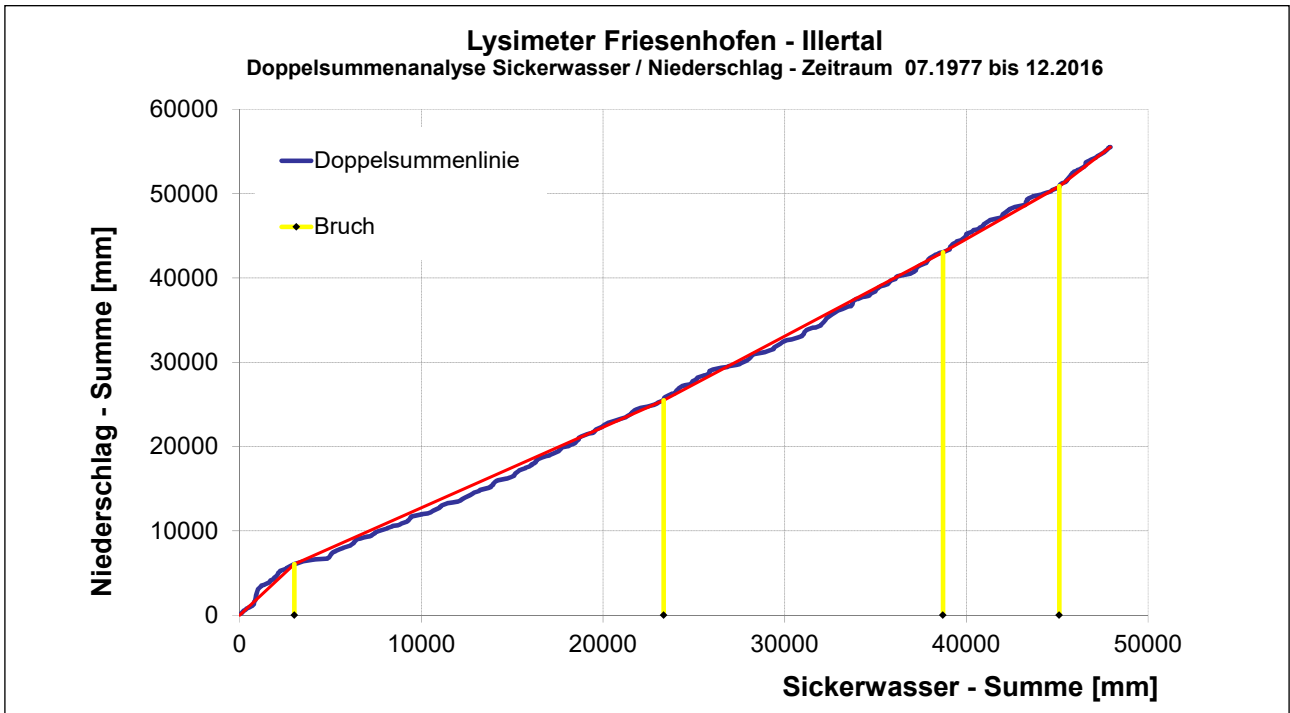
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Der Bodenwasserspeicher ist nahezu ganzjährig gut aufgefüllt und stellt kein wesentliches Hemmschwelle für die Versickerung dar. Die hohen Sickerungsraten größer 100% im Winter werden z.T. durch unangemessene Berücksichtigung des Schnees im Niederschlag verursacht.



Eckdaten (Zeitraum 1978-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	1.409 mm	Sickerwasser:	1.221 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 87%		Sommerhalbjahr: 54%	Winterhalbjahr: 130%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	1	Maximum: 8 Wochen (2015) Minimum: 0 Wochen (in 26 von 40 Jahren)		

Lysimeteranlage Graben-Neudorf

Niederschlagsmessstelle: 0400/258-9
 Sickerwassermessstelle: 0500/258-6
 Referenzgrundwassermessstelle: 0160/308-3

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	Monolith (ungestört)
Bodenüberdeckung:	0,46	Geländehöhe:	108,36 m+NN
Bodentyp:	Sandbraunerde	Landnutzung:	Ackerland
Naturraum:	Hardtebenen	Inbetriebnahme:	01.01.1964
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann ohne Windschutz
 Entfernung GW-Messstelle: 3.300 m
 Mittlerer Flurabstand: 5 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



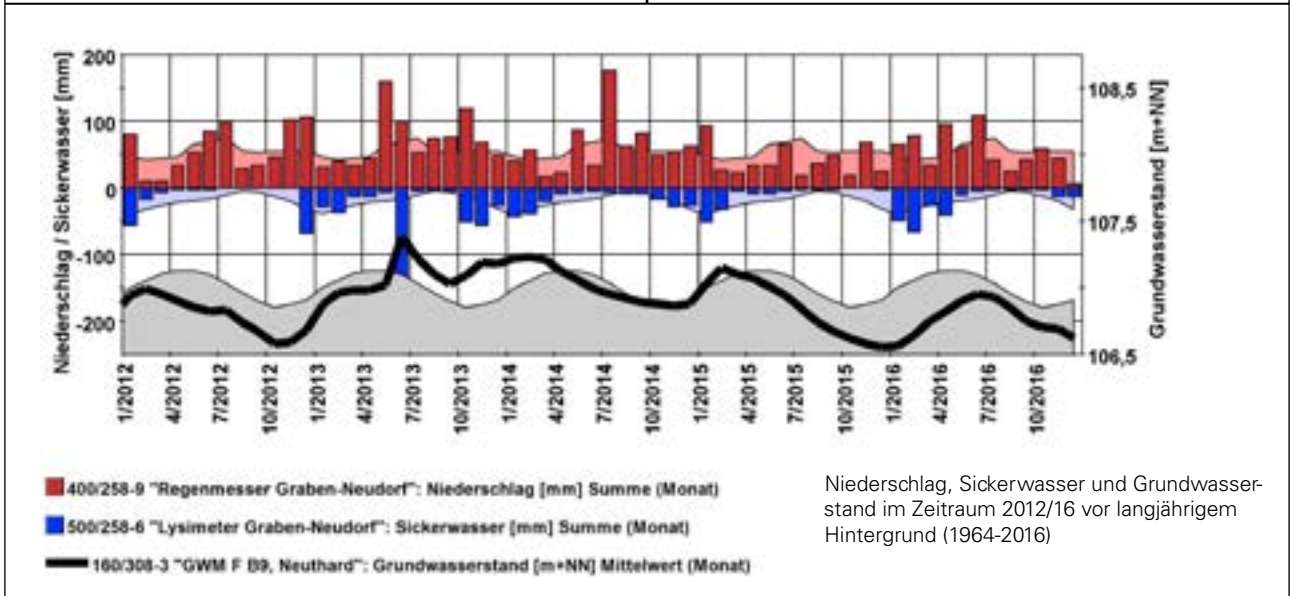
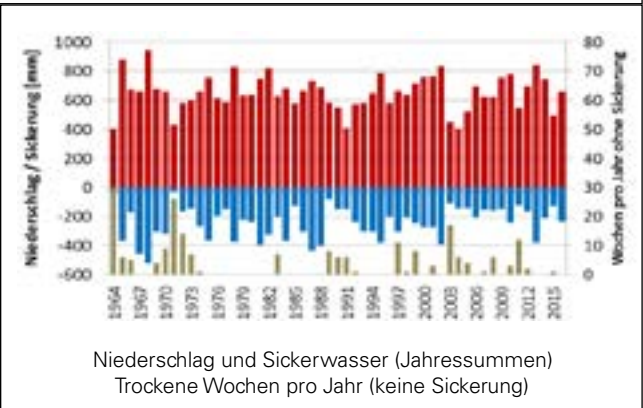
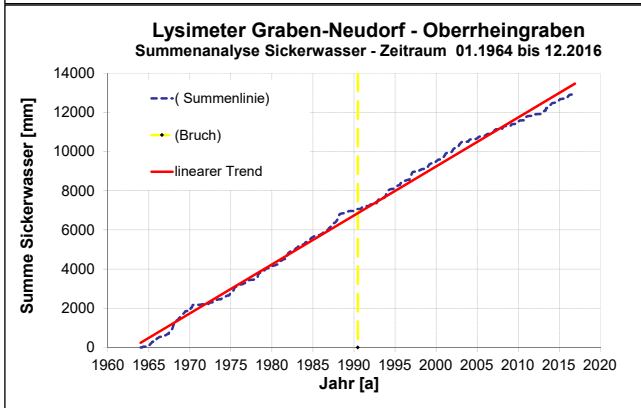
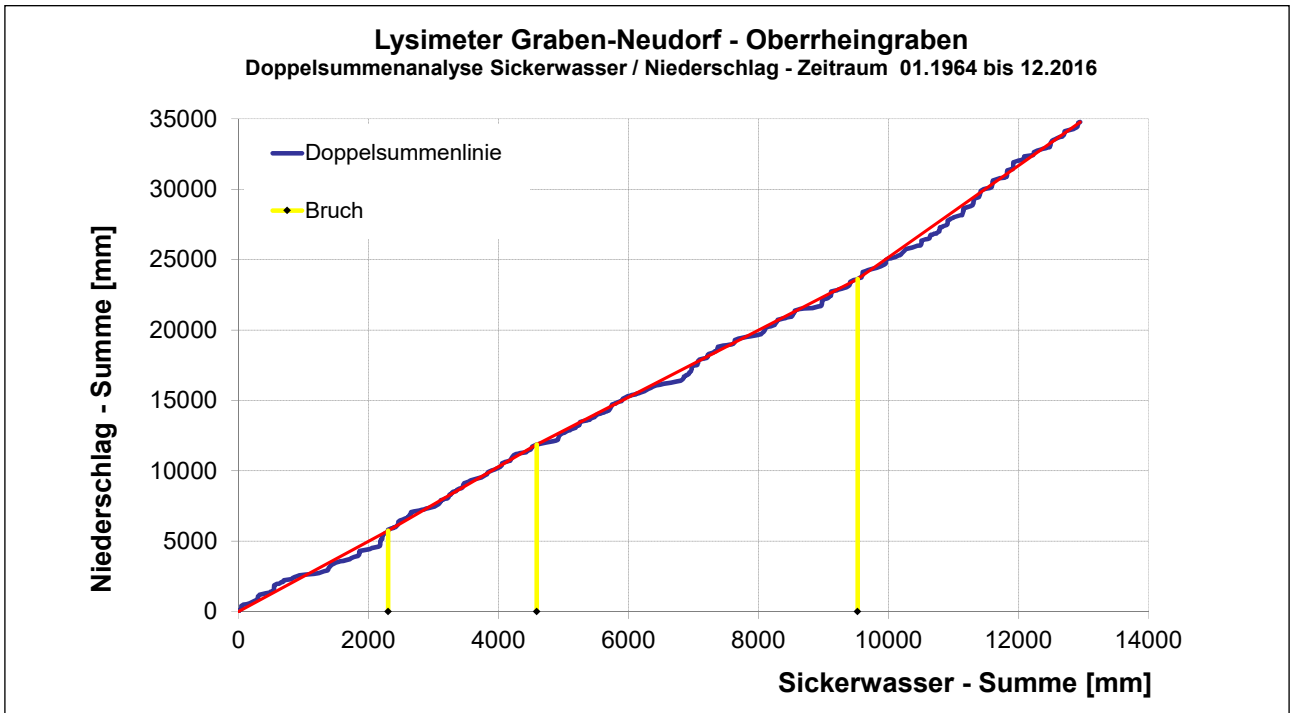
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Der Beobachtungsschacht der Lysimeteranlage Graben-Neudorf befindet sich auf einem Wasserkwerksgelände. Der Auffangbehälter wurde außerhalb des eingezäunten Bereichs unter einer Ackerfläche gestochen. Das Sickerverhalten ist insgesamt sehr ausgeglichen.



Eckdaten (Zeitraum 1964-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	656 mm	Sickerwasser:	244 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 37%		Sommerhalbjahr: 20%	Winterhalbjahr: 60%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	4	Maximum: 30 Wochen (1964) Minimum: 0 Wochen (in 26 von 53 Jahren)		

Lysimeteranlage Ichenheim

Niederschlagsmessstelle: 0400/065-5

Sickerwassermessstelle: 0500/065-4

Referenzgrundwassermessstelle: 0112/065-3

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	Ungestört (Monolith)
Bodenüberdeckung:	0,67 m	Geländehöhe:	149,17 m+NN
Bodentyp:	Lehmiger Sand und Kies	Landnutzung:	Ackerland
Naturraum:	Offenburger Rheinebene	Inbetriebnahme:	10.05.1974
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann

Entfernung GW-Messstelle: 2.200 m

Mittlerer Flurabstand: 2,4 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



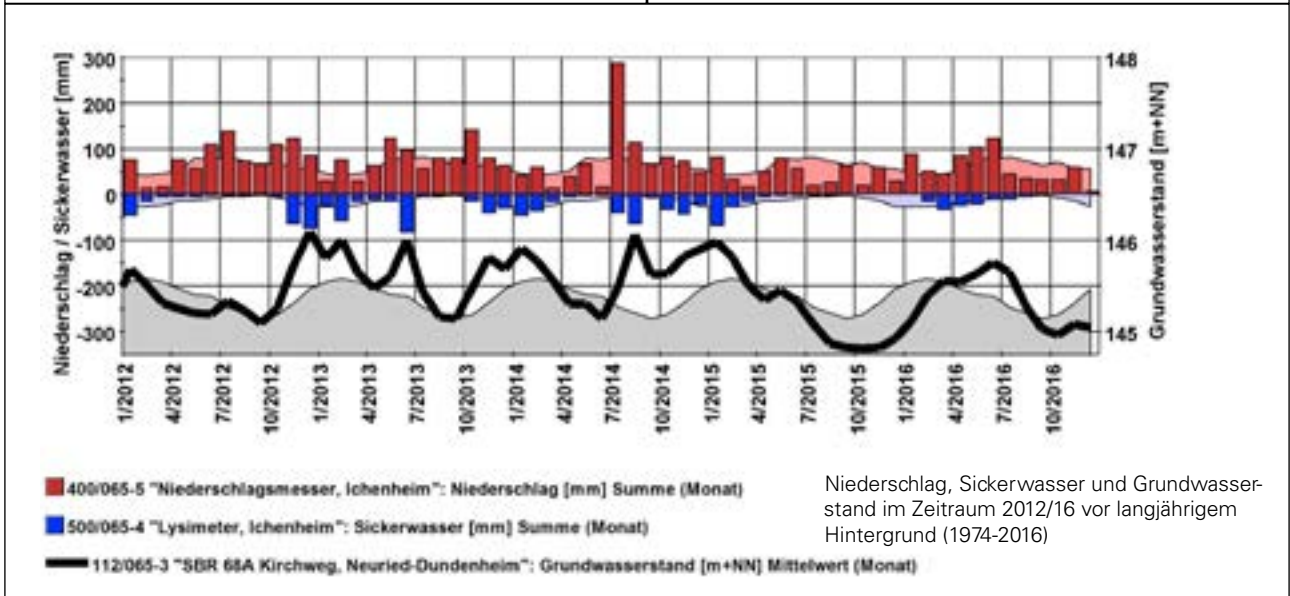
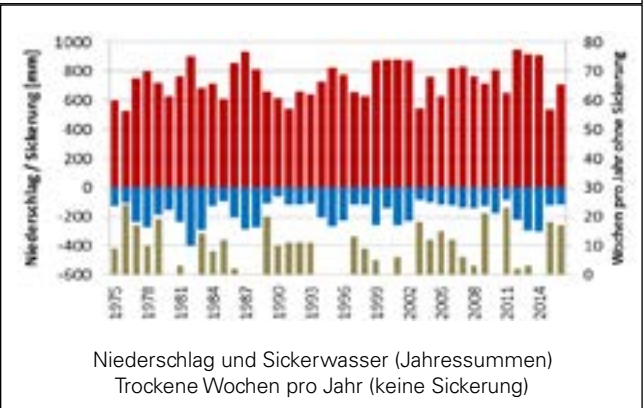
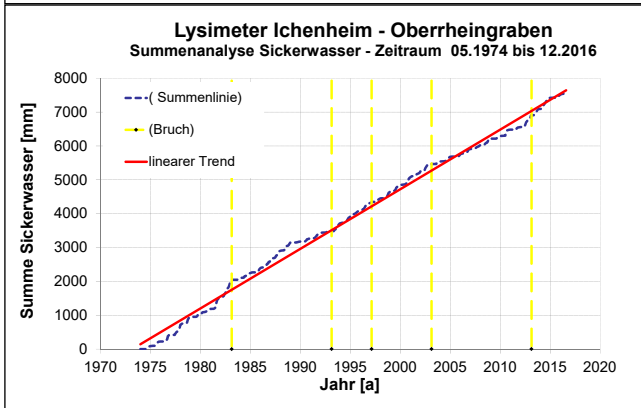
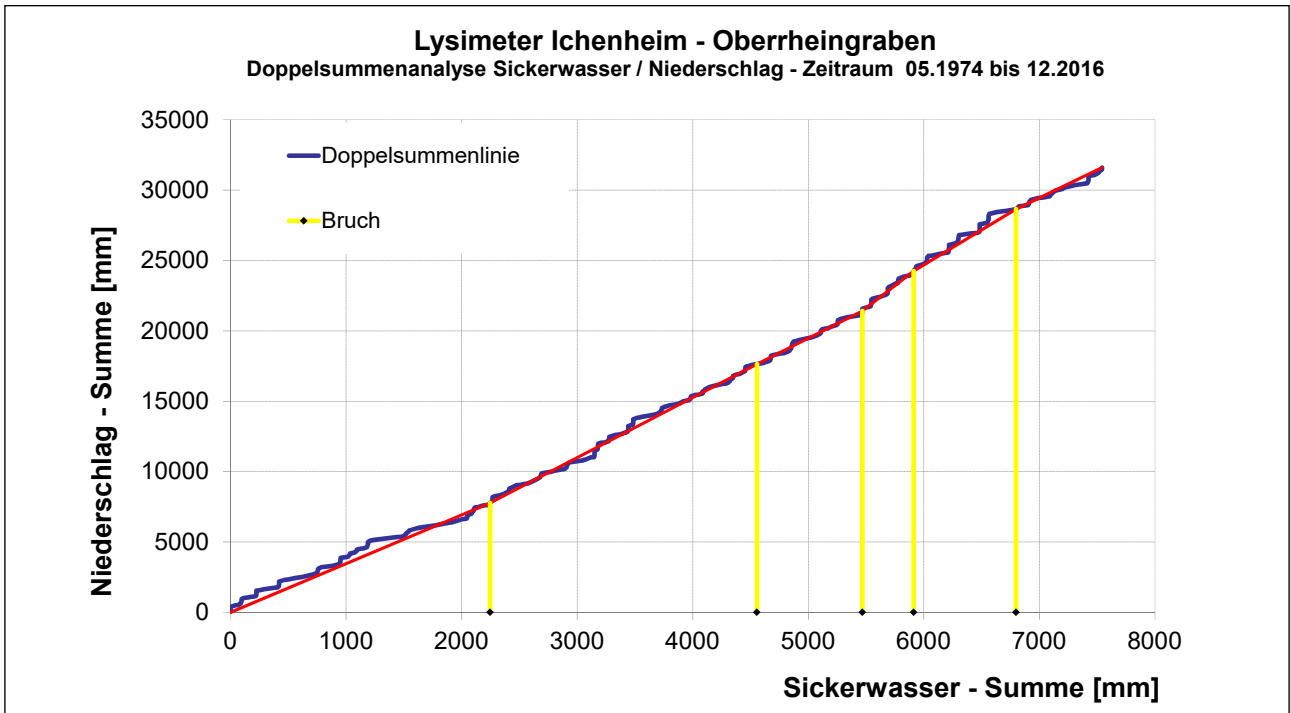
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Das Lysimeter befindet sich auf Wasserwerksgelände. Die lehmigen Bodenverhältnisse und die Landwirtschaft erklären die vergleichsweise geringen Versickerungsraten.



Eckdaten (Zeitraum 1975-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	742 mm	Sickerwasser:	179 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 24%		Sommerhalbjahr:	Winterhalbjahr:
			10%	44%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	9	Maximum:	24 Wochen (1976)	
		Minimum:	0 Wochen (in 11 von 43 Jahren)	

Lysimeteranlage Illerrieden I - stillgelegt

Niederschlagsmessstelle: 0400/767-2
Sickerwassermessstelle: 0500/767-1
Referenzgrundwassermessstelle: 0177/767-6

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	vermutlich ungestört
Bodenüberdeckung:	Ca. 0,50 m	Geländehöhe:	ca. 495 m+NN
Bodentyp:	Kalk. Braunerde über Kies	Landnutzung:	Ackerland
Naturraum:	Flachland der unteren Riss	Inbetriebnahme:	03.06.1977
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande	Stilllegung:	31.03.1999

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 600 m
Mittlerer Flurabstand: 1,3 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



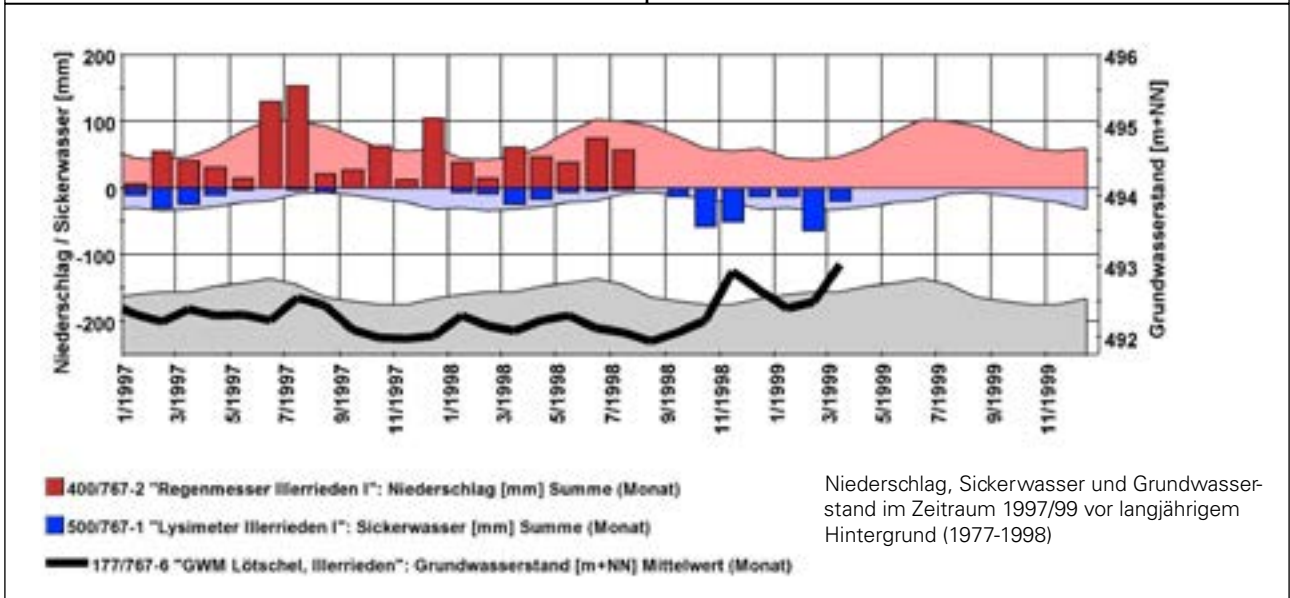
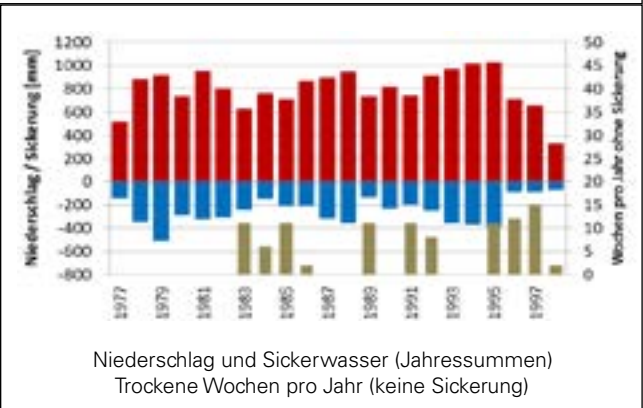
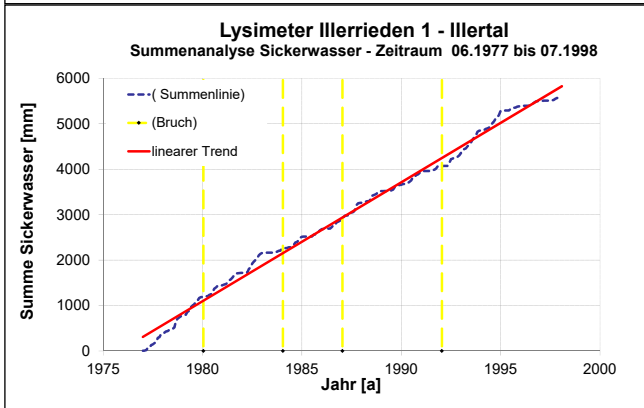
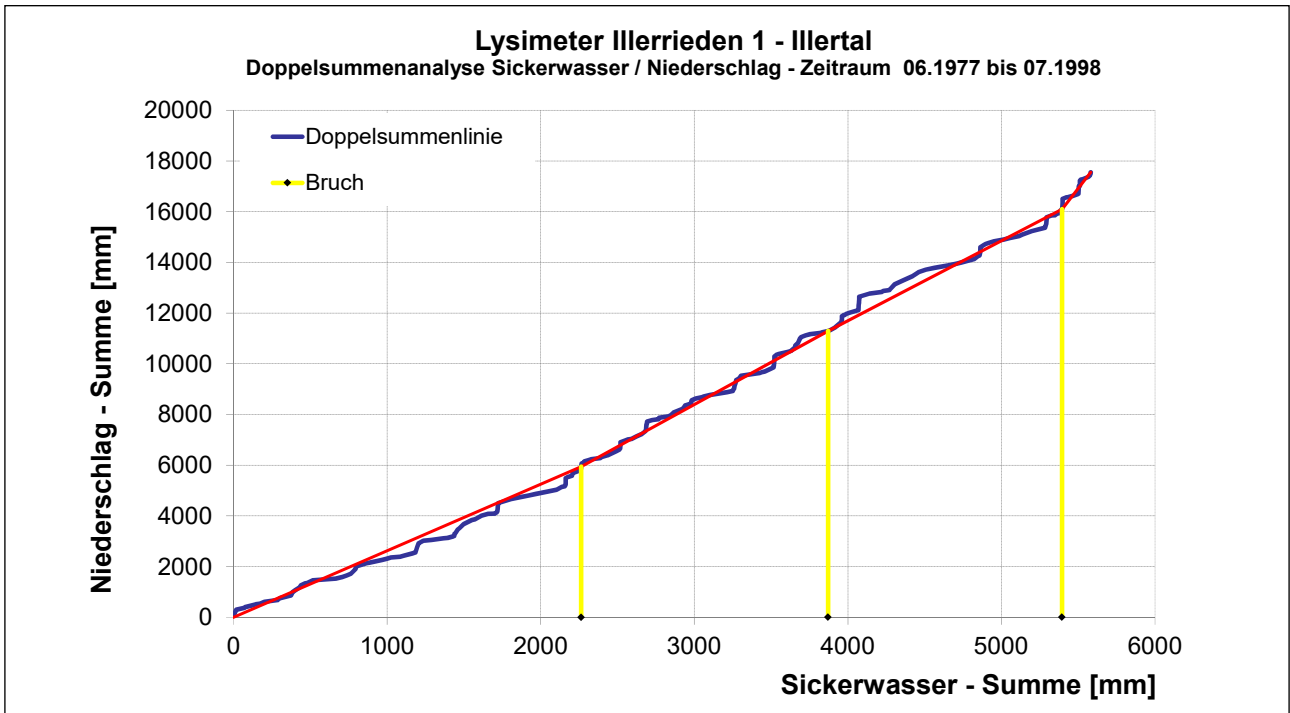
Orthophoto



Messstellenbild vor 1997 (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Das Lysimeter lag ungeschützt am Rand eines Getreideackers. Die Anlage wurde auf Wunsch des Grundstückseigentümers aufgegeben.



Eckdaten (Zeitraum 1978-1998)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	811 mm	Sickerwasser:	259 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 32%		Sommerhalbjahr: 16%	Winterhalbjahr: 58%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	5	Maximum: 15 Wochen (1997)	Minimum: 0 Wochen (in 11 von 22 Jahren)	

Lysimeteranlage Illerrieden II

Niederschlagsmessstelle: 0401/767-8
Sickerwassermessstelle: 0501/767-6
Referenzgrundwassermessstelle: 0177/767-6

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	vermutlich ungestört
Bodenüberdeckung:	ebenerdig	Geländehöhe:	ca. 495 m+NN
Bodentyp:	Kalk. Braunerde über Kies	Landnutzung:	Kleingärten, Bauhof
Naturraum:	Flachland der unteren Riss	Inbetriebnahme:	03.06.1977
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 1.000 m
Mittlerer Flurabstand: ca. 1,5 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



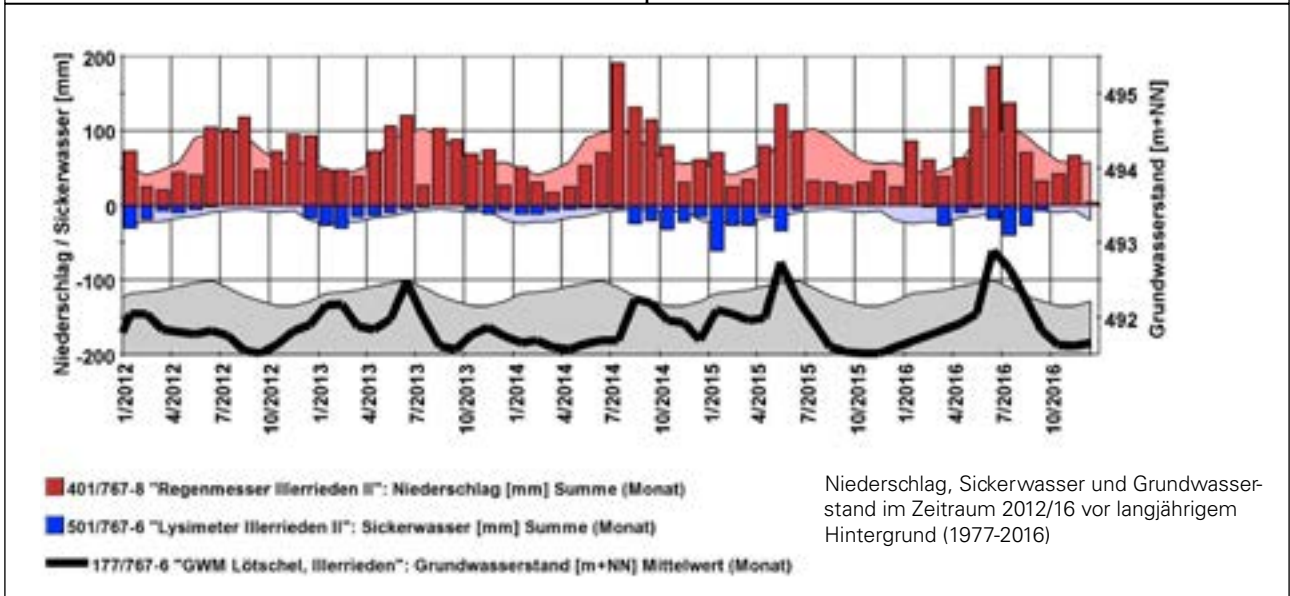
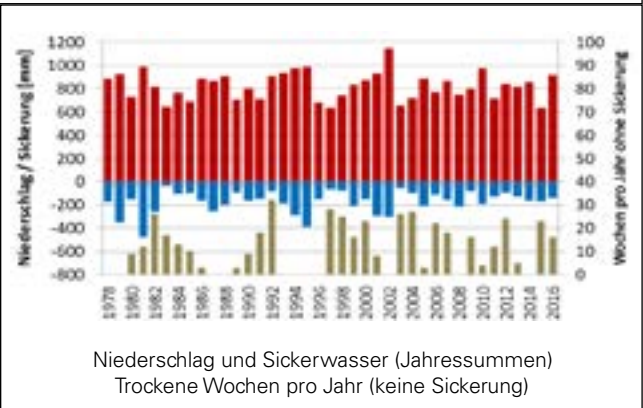
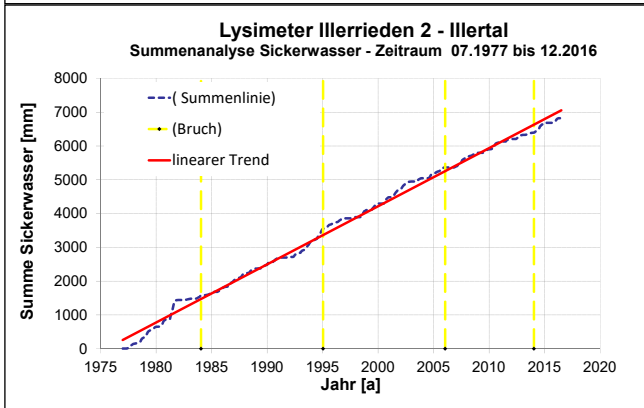
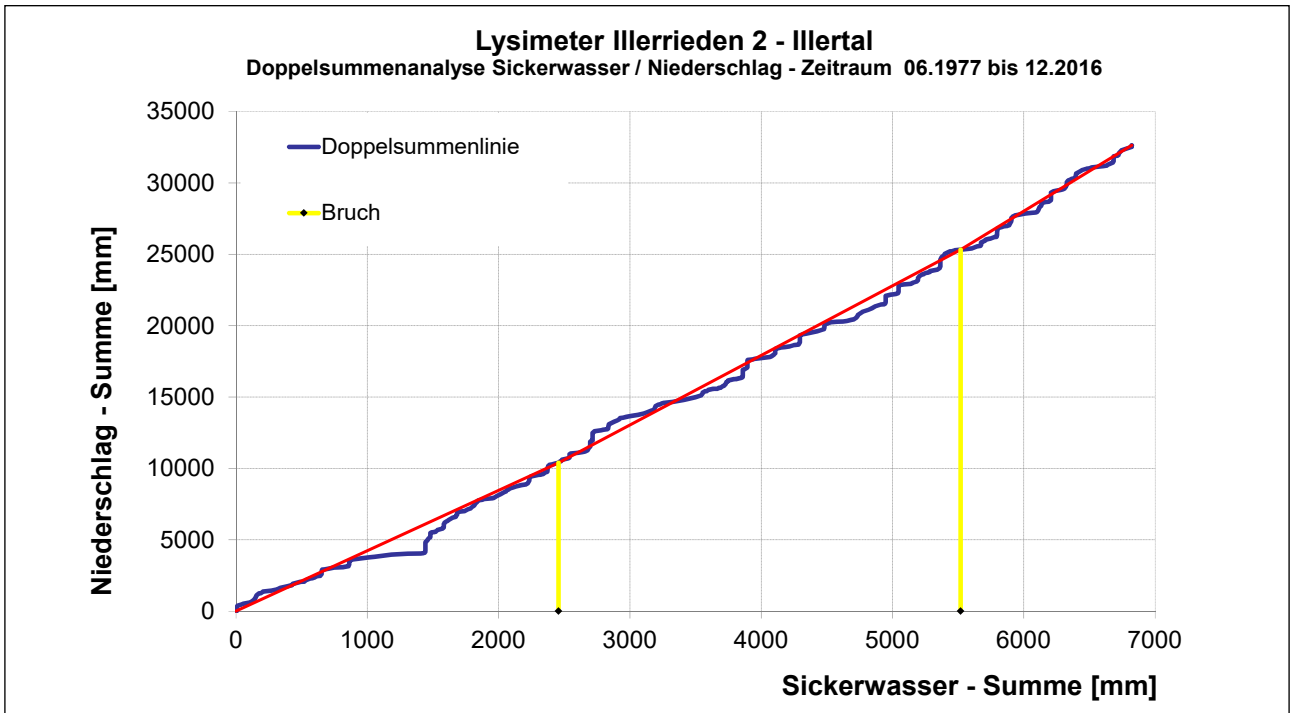
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Das Lysimeter wurde 1977 inmitten einer Kleingartenanlage eingerichtet. Seit der Erweiterung seiner Erweiterung im Jahr 1997 liegt die Anlage nun innerhalb des Bauhofsgeländes. Niederschlag und Sickerung wurden von der Umgestaltung nicht wesentlich beeinträchtigt.



Eckdaten (Zeitraum 1978-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	826 mm	Sickerwasser:	174 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 21%		Sommerhalbjahr:	11%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	12	Maximum:	32 Wochen (1992)	
		Minimum:	0 Wochen (in 11 von 49 Jahren)	

Lysimeteranlage Kappel

Niederschlagsmessstelle: 0400/067-0
Sickerwassermessstelle: 0500/067-8
Referenzgrundwassermessstelle: 0115/067-0

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	vermutlich Monolith
Bodenüberdeckung:	ca. 0,50 m	Geländehöhe:	162,90 m+NN
Bodentyp:	lehmgiger Kies unter Ton	Landnutzung:	Ackerland
Naturraum:	Offenburger Rheinebene	Inbetriebnahme:	12.01.1973
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 1.800 m
Mittlerer Flurabstand: 2,8 m

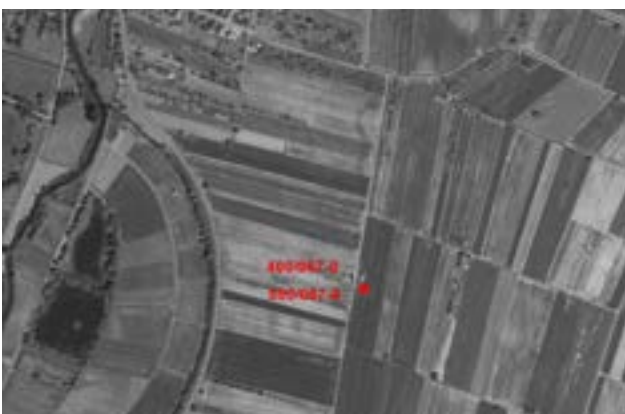
Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



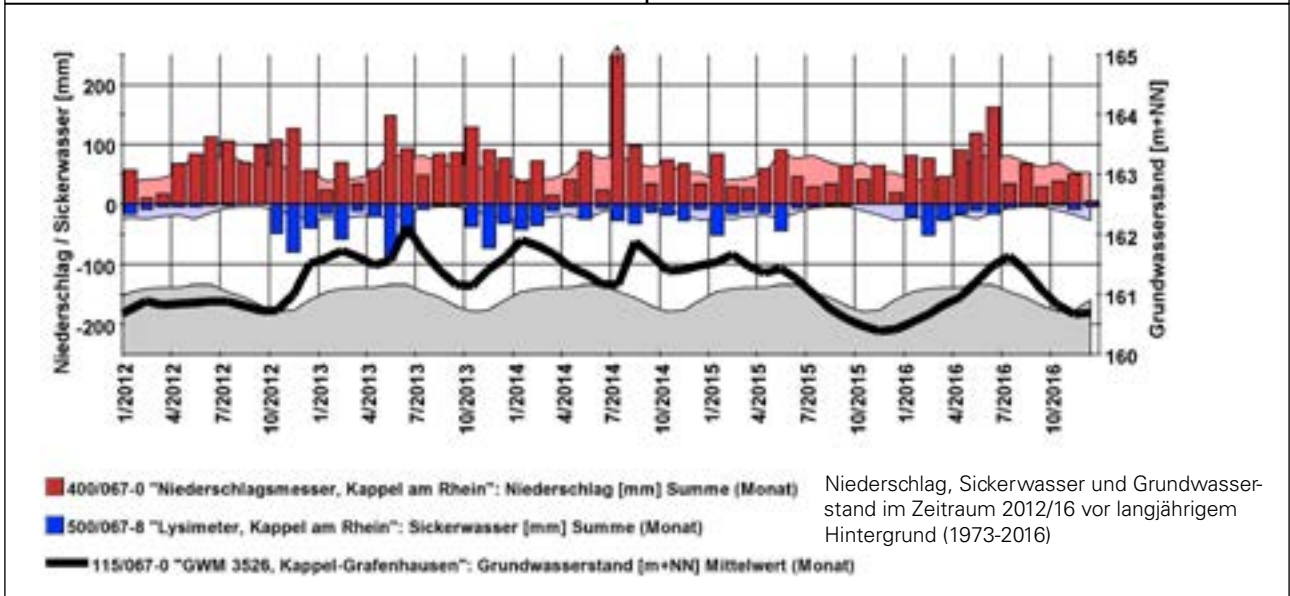
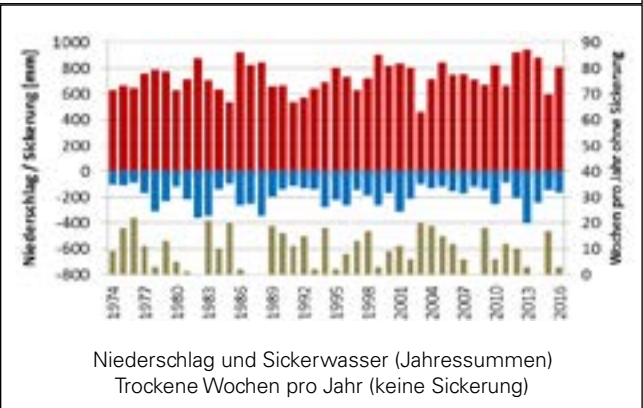
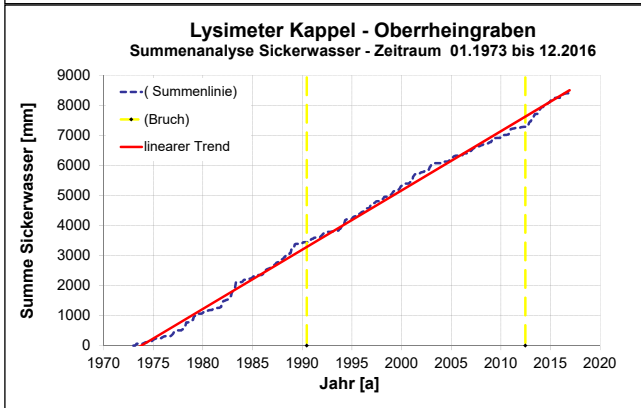
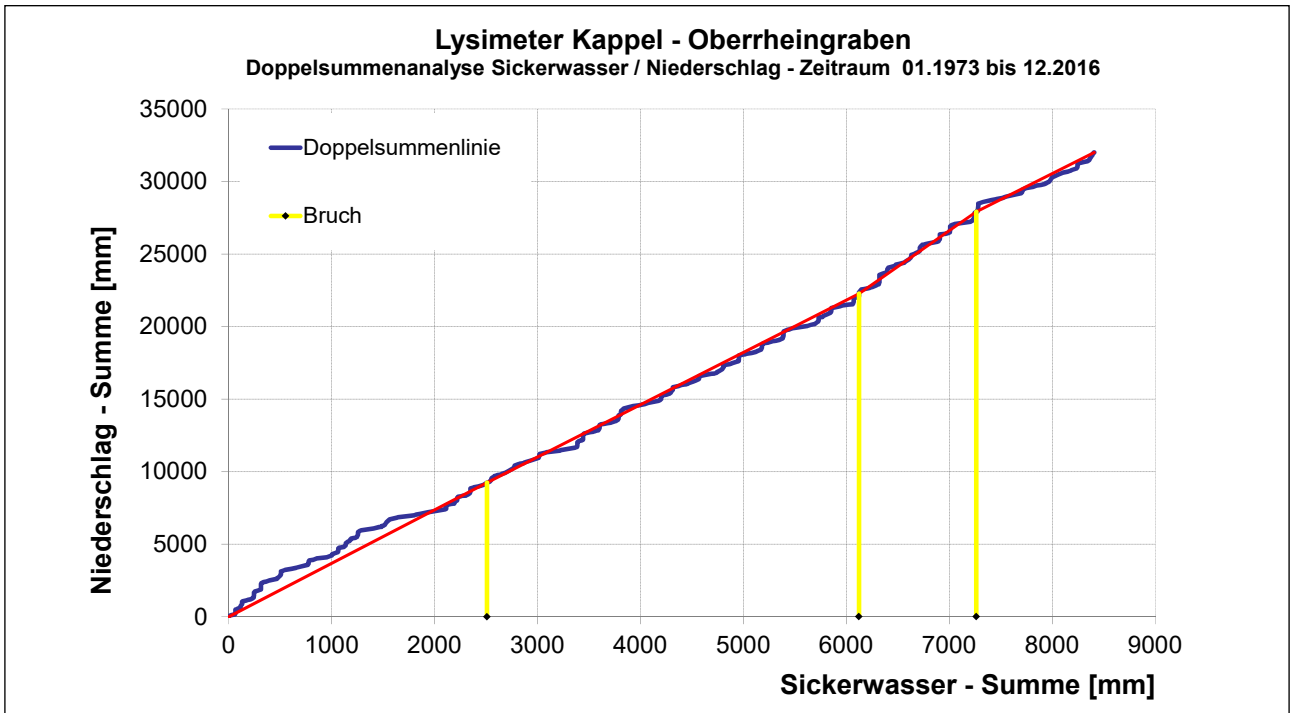
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Der Lysimeterkontrollschacht befindet sich auf Wasserwerksgelände. Der Auffangbehälter wurde außerhalb des eingezäunten Bereichs unter einer Ackerfläche gestochen. Bindige Böden und verdichtete Deckschichten infolge der Landwirtschaft sind mögliche Gründe für die vergleichsweise geringen Versickerungsanteile.



Eckdaten (Zeitraum 1973-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	727 mm	Sickerwasser:	191 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 26%		Sommerhalbjahr:	Winterhalbjahr:
			11%	38%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	11	Maximum:	22 Wochen (1976)	
		Minimum:	0 Wochen (in 5 von 44 Jahren)	

Lysimeteranlage Lahr

Niederschlagsmessstelle: 0400/066-8
Sickerwassermessstelle: 0500/066-6
Referenzgrundwassermessstelle: 0115/066-9

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	gestört
Bodenüberdeckung:	ebenerdig	Geländehöhe:	Ca. 156 m+NN
Bodentyp:	toniger Lehm	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Offenburger Rheinebene	Inbetriebnahme:	02.12.1963
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann
Entfernung GW-Messstelle: 500 m
Mittlerer Flurabstand: 2 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



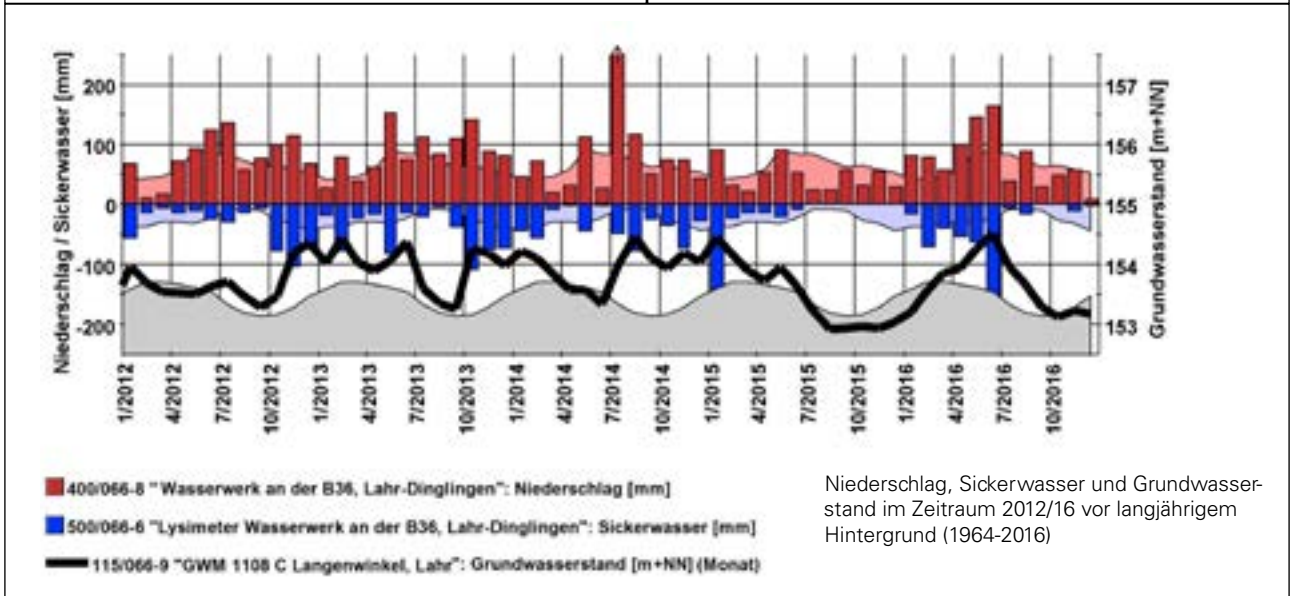
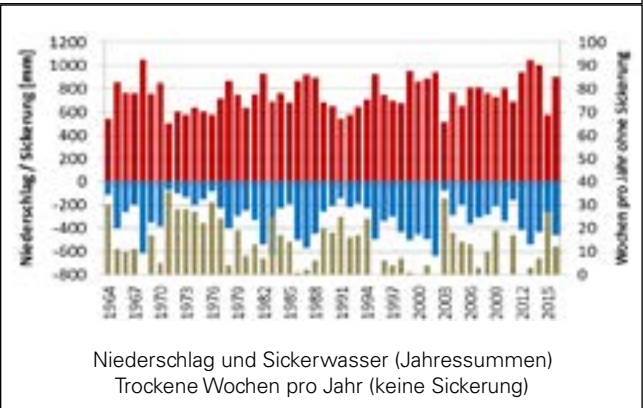
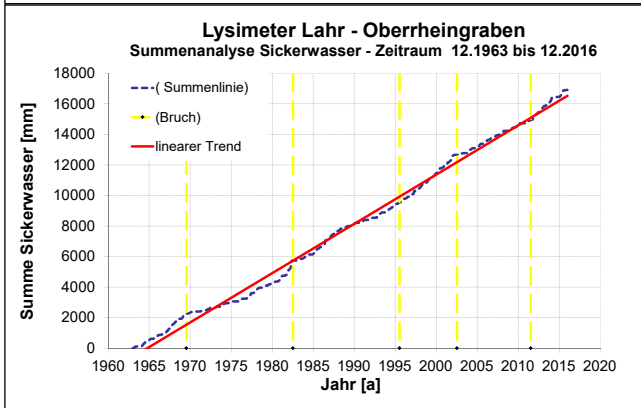
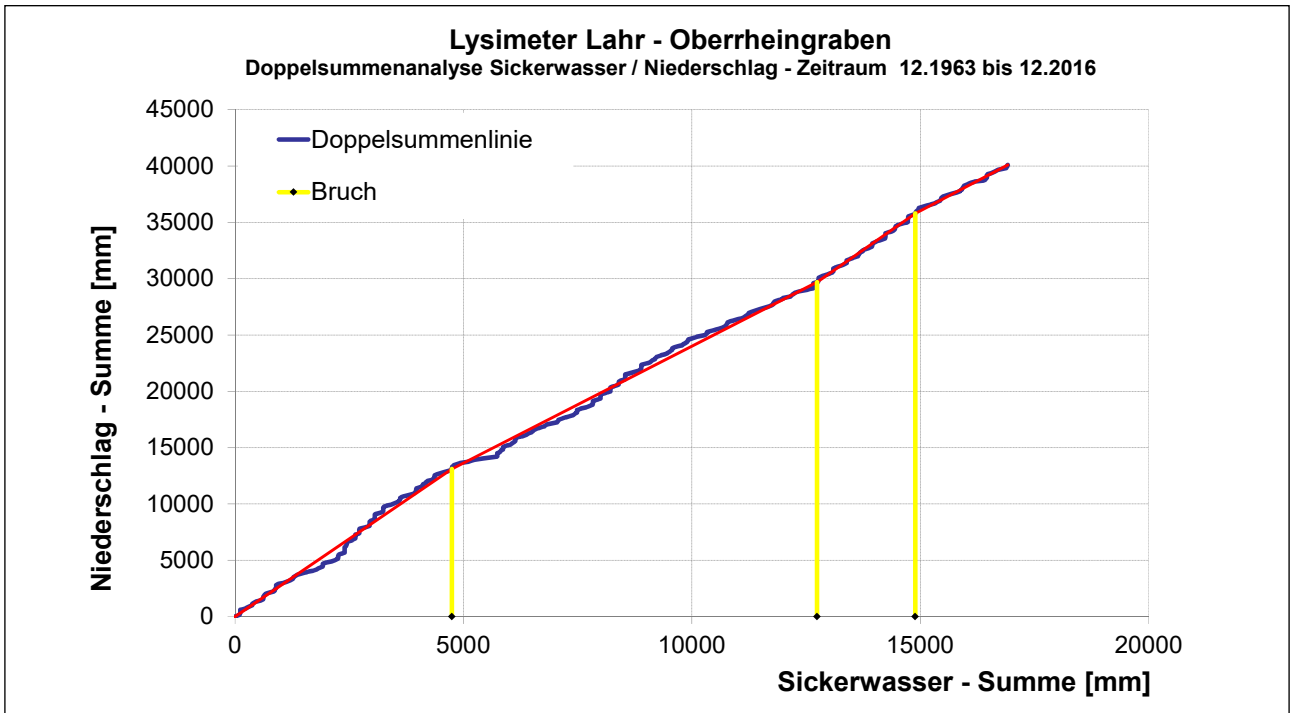
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Das Lysimeter befindet sich auf dem Gelände eines stillgelegten Wasserwerks, das zurzeit als Bogenschießanlage genutzt wird. Es steht im Regenschatten westlich und südliche gelegener Bäume.



Eckdaten (Zeitraum 1964-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	757 mm	Sickerwasser:	319 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 42%		Sommerhalbjahr:	Winterhalbjahr:
			24%	69%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	13	Maximum:	36 Wochen (1971)	
		Minimum:	0 Wochen (in 6 von 53 Jahren)	

Lysimeteranlage Neuburgweier Außen

Niederschlagsmessstelle: 0401/210-8
Sickerwassermessstelle: 0502/210-0
Referenzgrundwassermessstelle: 0110/210-0

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	Monolith (ungestört)
Bodenüberdeckung:	0,58	Geländehöhe:	107,22 m+NN
Bodentyp:	Kiesiger Sand	Landnutzung:	Ackerland
Naturraum:	nördl. Oberrheinniederung	Inbetriebnahme:	01.11.1973
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann ohne Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 1.300 m
Mittlerer Flurabstand: 2 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



Orthophoto

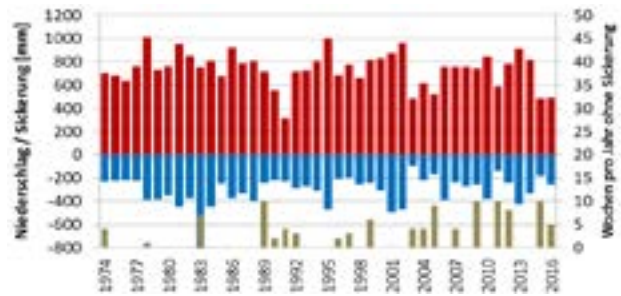
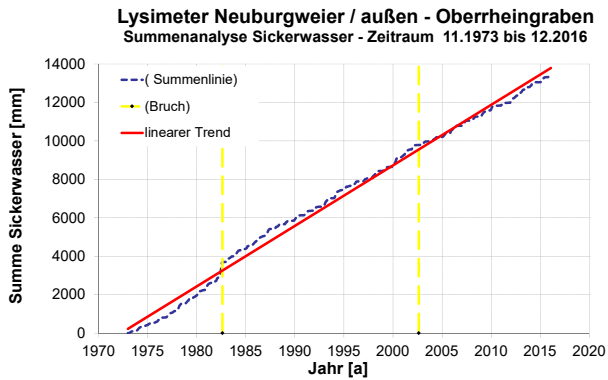
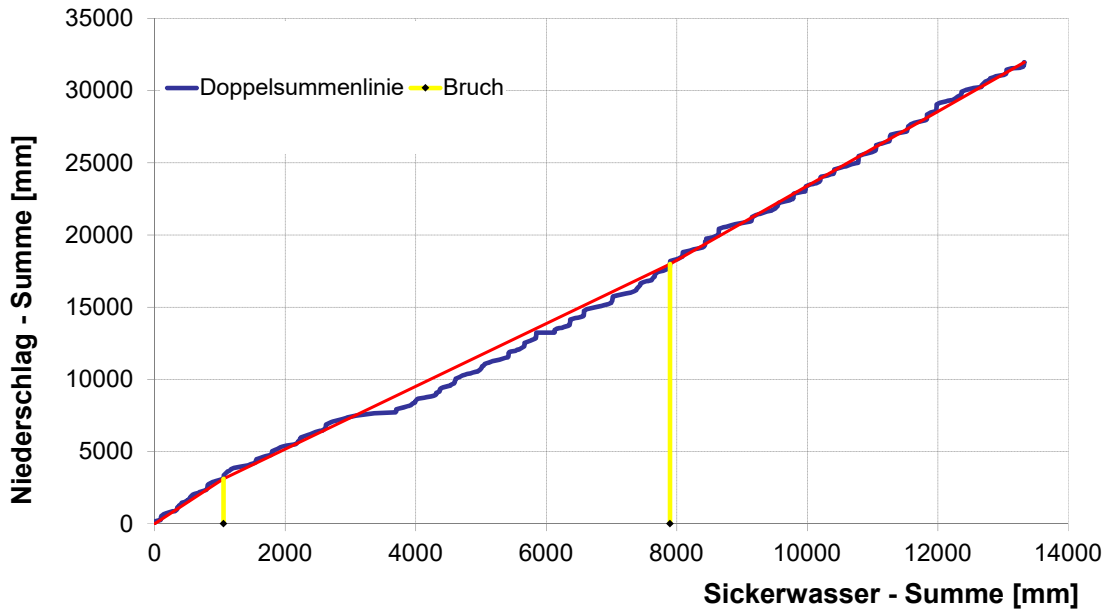


Messstellenbild (Quelle: LUBW)

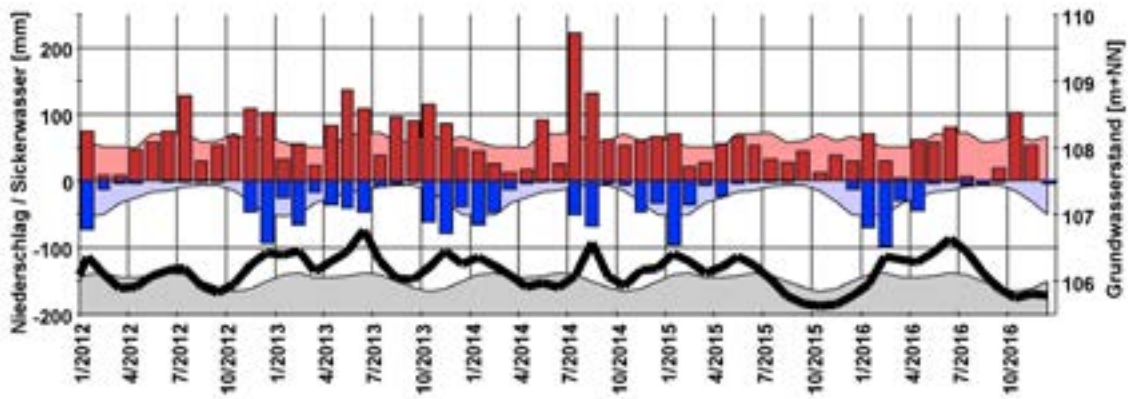
Bemerkung:

Die Kontrollschacht der Lysimeteranlage Neuburgweier Außen ist auf einem Wasserwerkgelände zugänglich. Die Landbewirtschaftung bewirkt im Herbst höhere Versickerungsraten als am gleichen Standort, unter Dauergrünland betriebenen Gerät (Neuburgweier innen, 501/210-5).

Lysimeter Neuburgweiler / außen - Oberrheingraben
 Doppelsummenanalyse Sickerwasser / Niederschlag - Zeitraum 11.1973 bis 12.2016



Niederschlag und Sickerwasser (Jahressummen)
 Trockene Wochen pro Jahr (keine Sickerung)



401/210-8 "Regenmesser Neuburgweiler": Niederschlag [mm] Summe (Monat)
 502/210-0 "Lysimeter Außen, Neuburgweiler": Sickerwasser [mm] Summe (Monat)
 110/210-0 "GWM 3436 3, Au am Rhein": Grundwasserstand [m+NN] Mittelwert (Monat)

Niederschlag, Sickerwasser und Grundwasserstand im Zeitraum 2012/16 vor langjährigem Hintergrund (1973-2016)

Eckdaten (Zeitraum 1974-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	741 mm	Sickerwasser:	310 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 42%		Sommerhalbjahr:	Winterhalbjahr:
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	2	Maximum:	10 Wochen (1989, 2009, 2011, 2015)	
		Minimum:	0 Wochen (in 24 von 43 Jahren)	

Lysimeteranlage Neuburgweier Innen

Niederschlagsmessstelle: 0401/210-8
Sickerwassermessstelle: 0501/210-5
Referenzgrundwassermessstelle: 0110/210-0

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	Monolith (ungestört)
Bodenüberdeckung:	ebenerdig	Geländehöhe:	107,22 m+NN
Bodentyp:	Kiesiger Sand	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	nördl. Oberrheinniederung	Inbetriebnahme:	01.11.1973
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann ohne Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 1.300 m
Mittlerer Flurabstand: 2 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



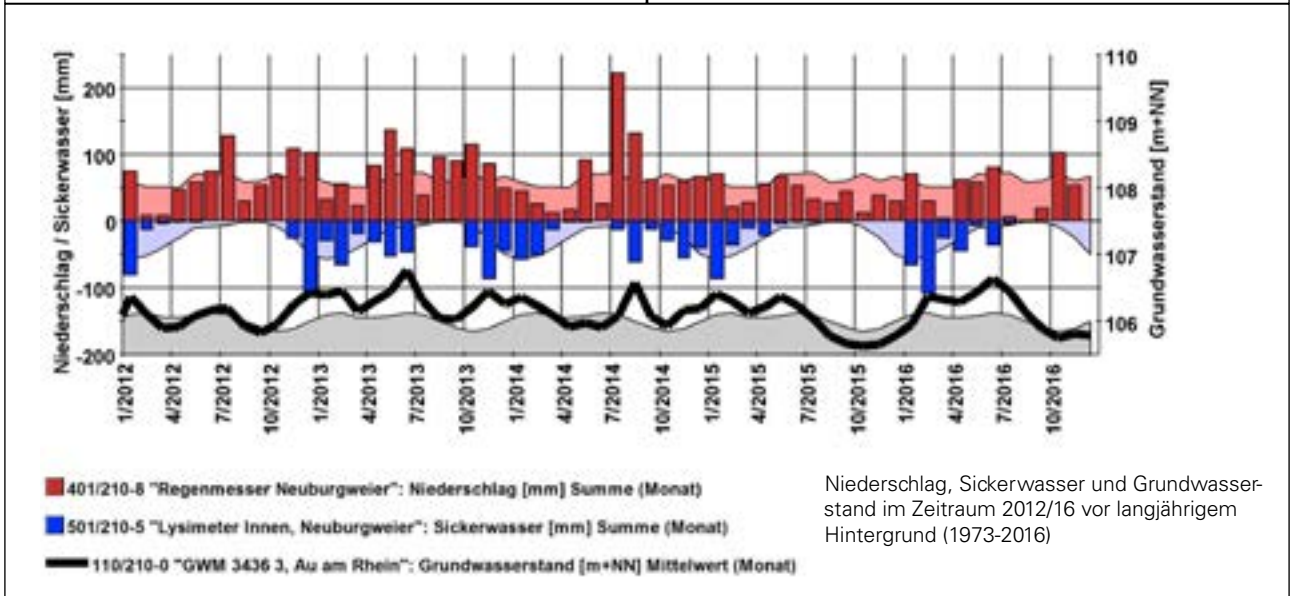
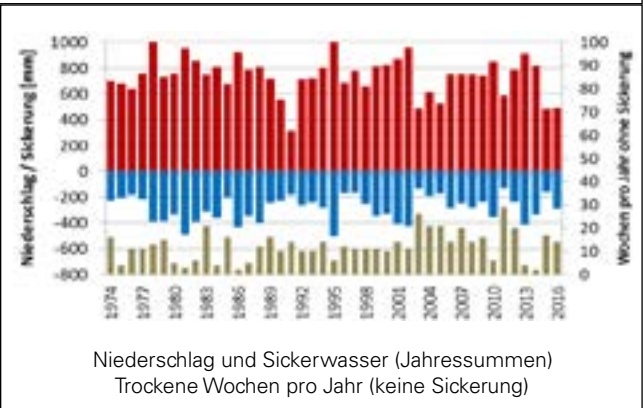
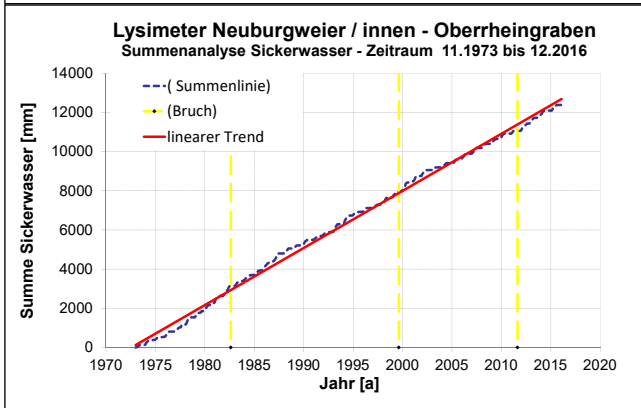
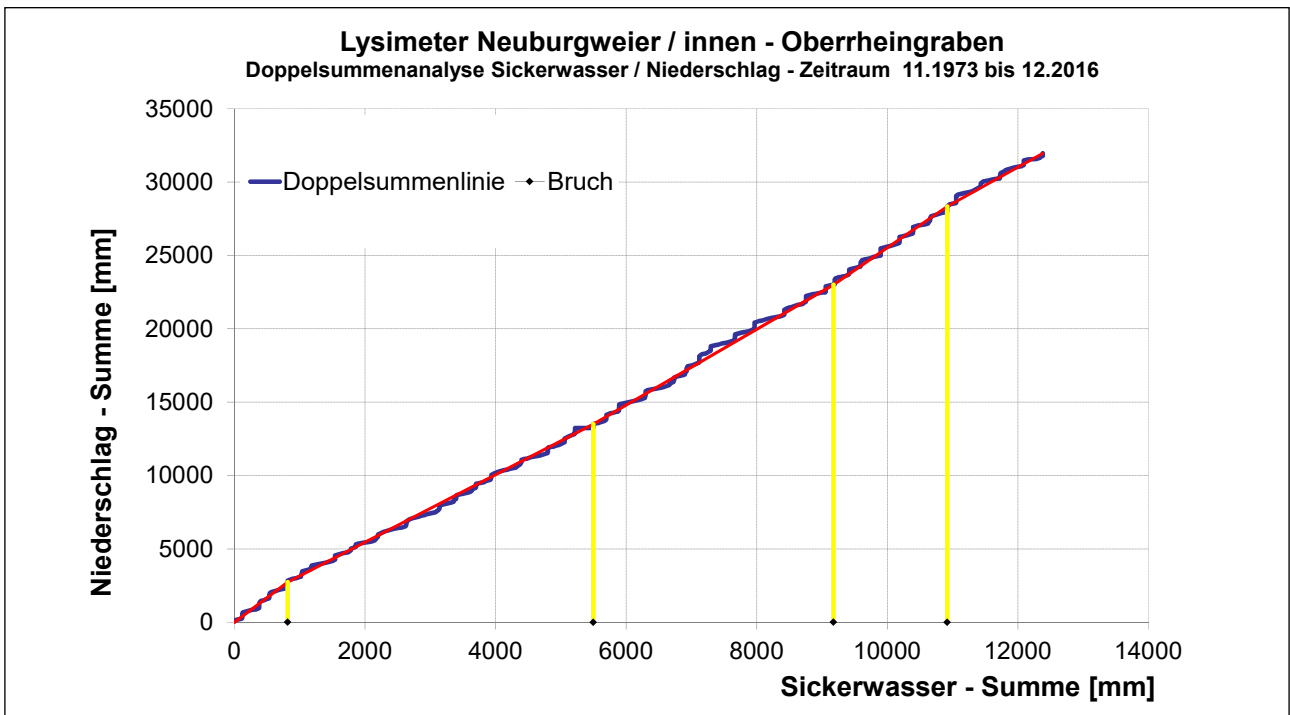
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Die Lysimeteranlage Neuburgweier Innen wurde auf einem Wasserwerkgelände eingerichtet. Der Versickerungsanteil der Sommerniederschläge ist sehr gering. Am gleichen Standort wird ein weiteres Lysimeter unter Ackergelände betrieben (Neuburgweier außen, 502/210-0).



Eckdaten (Zeitraum 1974-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	741 mm	Sickerwasser:	287 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 39%		Sommerhalbjahr:	17%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	12	Maximum:	29 Wochen (2011)	
		Minimum:	2 Wochen (1986, 2014)	

Lysimeteranlage Oberhausen - stillgelegt

Niederschlagsmessstelle: 0400/257-6

Sickerwassermessstelle: 0500/257-4

Referenzgrundwassermessstelle: 0119/307-5

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	Monolith (ungestört)
Bodenüberdeckung:	ebenerdig	Geländehöhe:	103,99 m+NN
Bodentyp:	Sandbraunerde	Landnutzung:	Wiese, Waldlichtung
Naturraum:	Hardtebenen	Inbetriebnahme:	01.01.1973
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande	Stilllegung:	30.04.2003

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp:	Hellmann ohne Windschutz
Entfernung GW-Messstelle:	2.900 m
Mittlerer Flurabstand:	6,5 m

Lage:



Übersichtskarte



Detailkarte (Lysimeter)



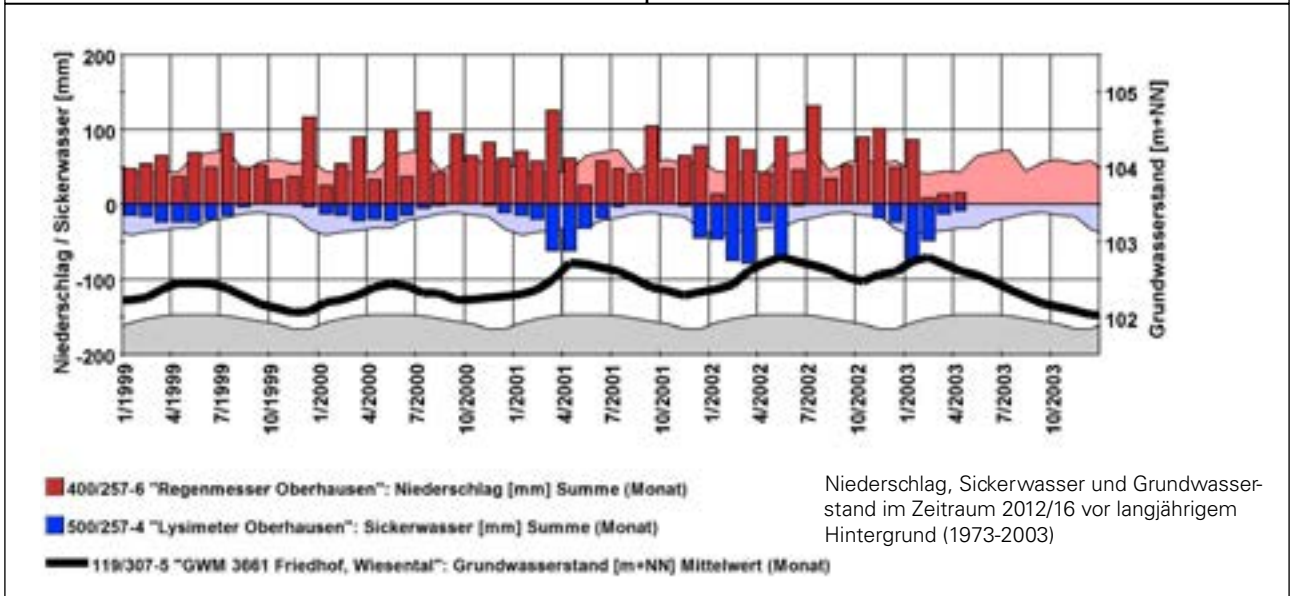
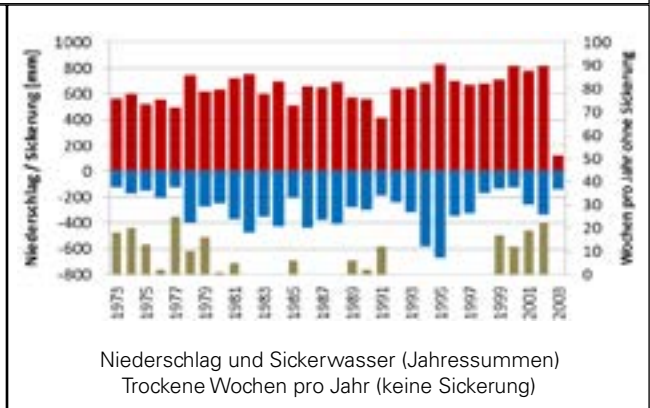
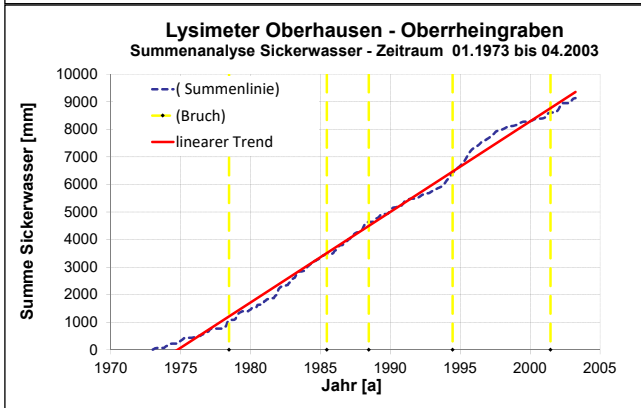
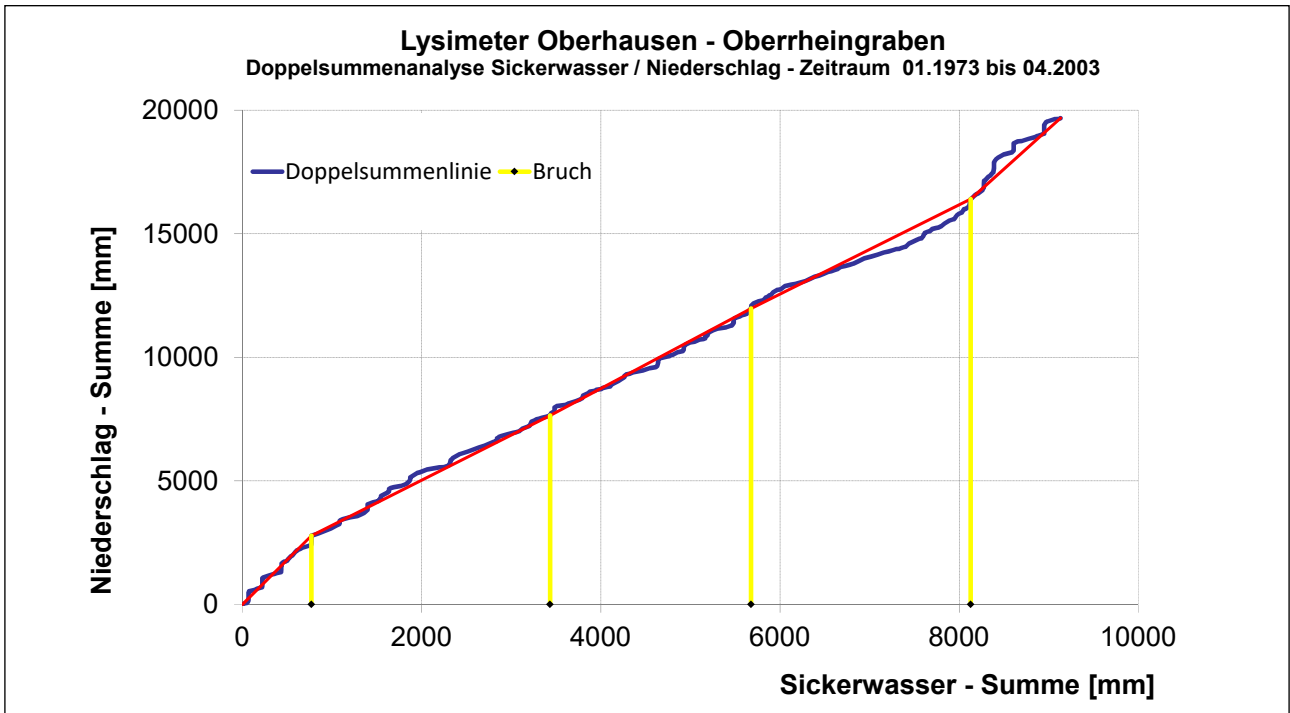
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Die Lysimeteranlage Oberhausen befindet sich auf Wasserwerksgelände in einer Waldlichtung im Wind- und Regenschatten von hohen Bäumen, wodurch die geringe jährliche Niederschlagsmenge erklärt werden. Die Messstelle wurde aus diesem Grund und wegen einer undichten Sickerleitung im April 2003 stillgelegt.



Eckdaten (Zeitraum 1973-2002)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	656 mm	Sickerwasser:	304 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 46%		Sommerhalbjahr:	29%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	7	Maximum:	25 Wochen (1977)	
		Minimum:	0 Wochen (in 14 von 31 Jahren)	

Lysimeteranlage Rauental

Niederschlagsmessstelle: 0400/211-5
Sickerwassermessstelle: 0500/211-2
Referenzgrundwassermessstelle: 0124/211-6

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	Monolith (ungestört)
Bodenüberdeckung:	0,44	Geländehöhe:	126,51 m+NN
Bodentyp:	Stark schluffiger Sand	Landnutzung:	Streuobstwiese
Naturraum:	Hardtebenen	Inbetriebnahme:	01.10.1963
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann ohne Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 2.550 m
Mittlerer Flurabstand: 10,5 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



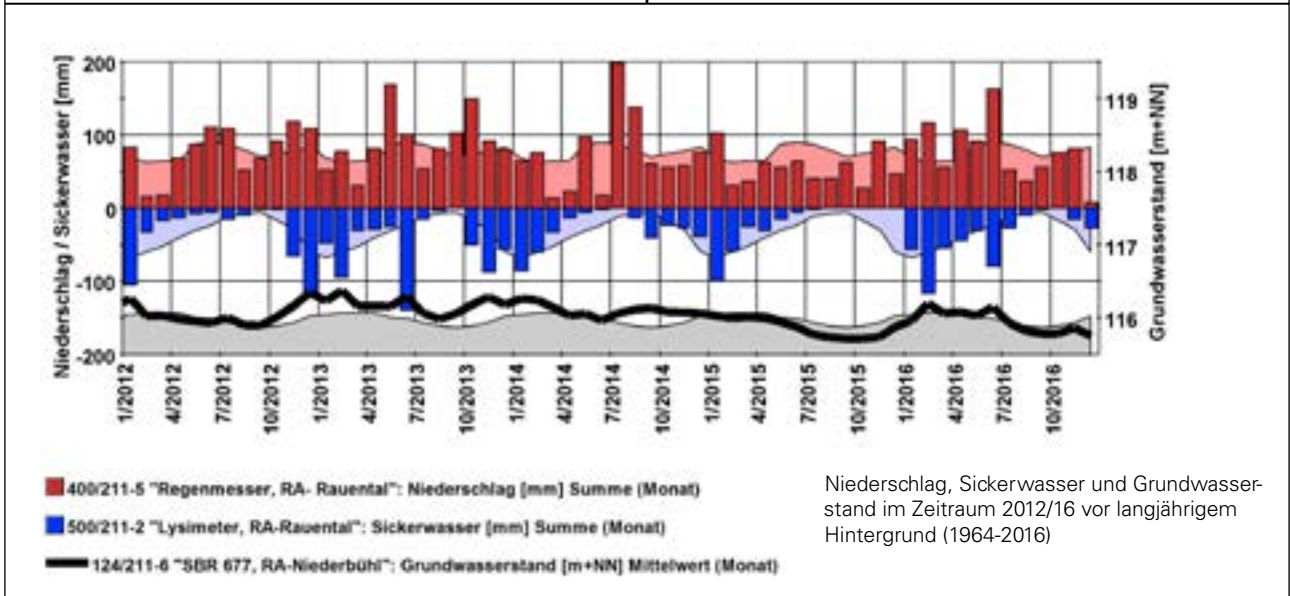
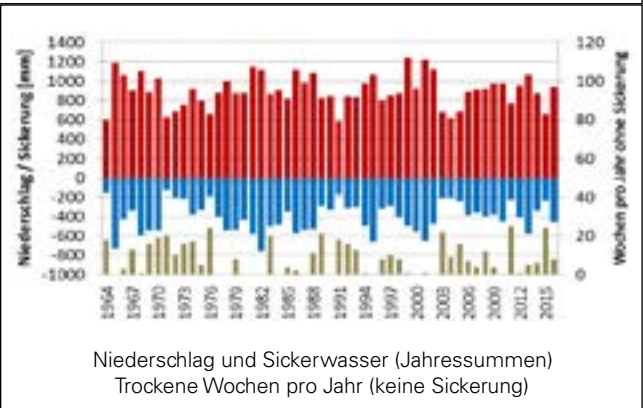
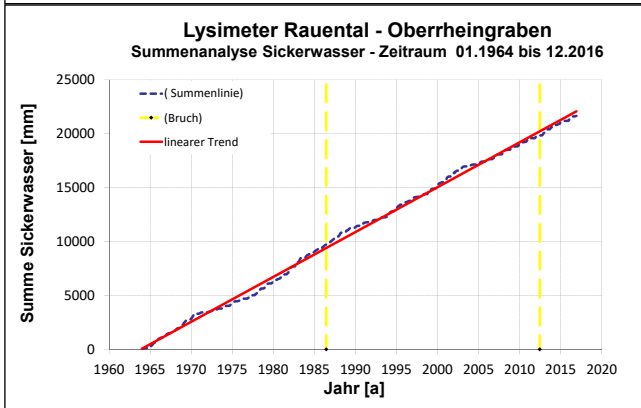
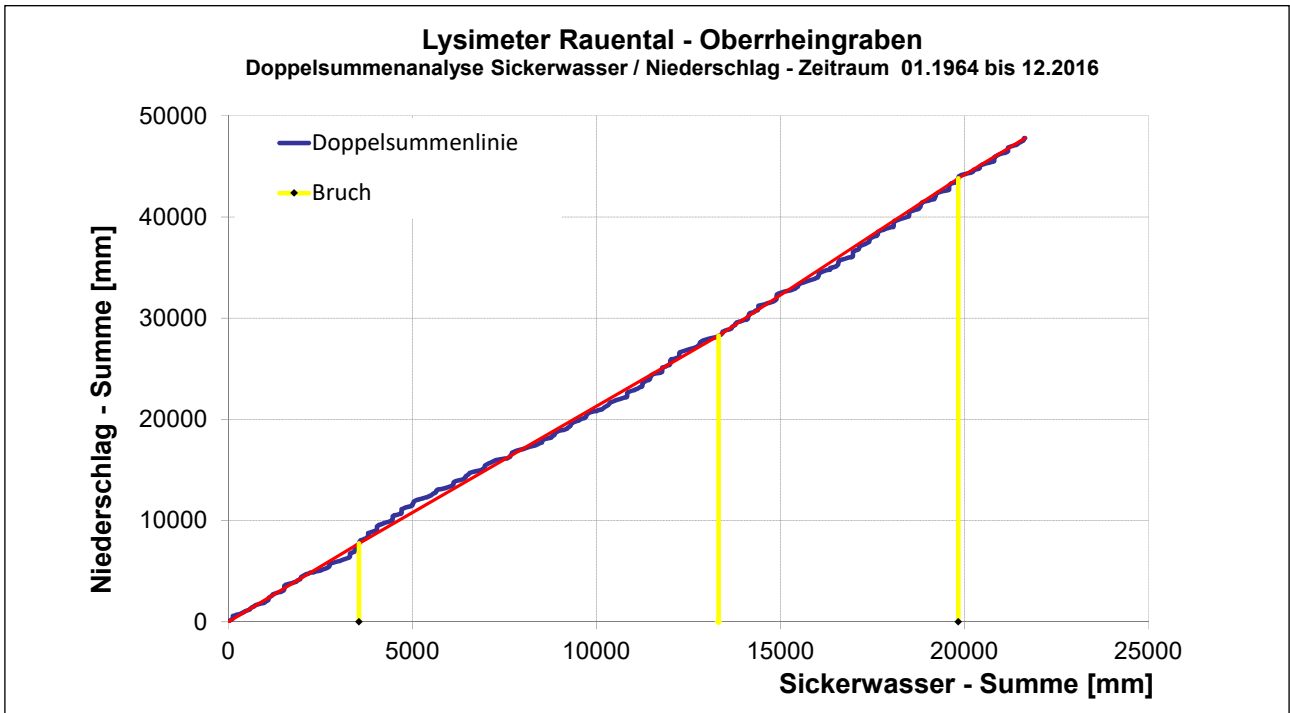
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Die Kontrollschacht der Lysimeteranlage Rauental ist auf einem ehemaligen Wasserwerkgelände zugänglich. Der Auffangbehälter wurde außerhalb des eingezäunten Bereichs unter einer Streuobstwiese gestochen.



Eckdaten (Zeitraum 1964-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	902 mm	Sickerwasser:	408 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 45%		Sommerhalbjahr: 20%	Winterhalbjahr: 75%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	8	Maximum: 25 Wochen (2011) Minimum: 0 Wochen (in 13 von 53 Jahren)		

Lysimeteranlage Rielasingen

Niederschlagsmessstelle: 0402/422-1
Sickerwassermessstelle: 0502/422-4
Referenzgrundwassermessstelle: 0132/422-5

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	vermutlich ungestört
Bodenüberdeckung:	nicht bekannt	Geländehöhe:	Ca. 420 m+NN
Bodentyp:	Braunerde aus Schottern	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Bodensee	Inbetriebnahme:	01.05.1979
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 3.500 m
Mittlerer Flurabstand: 3 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



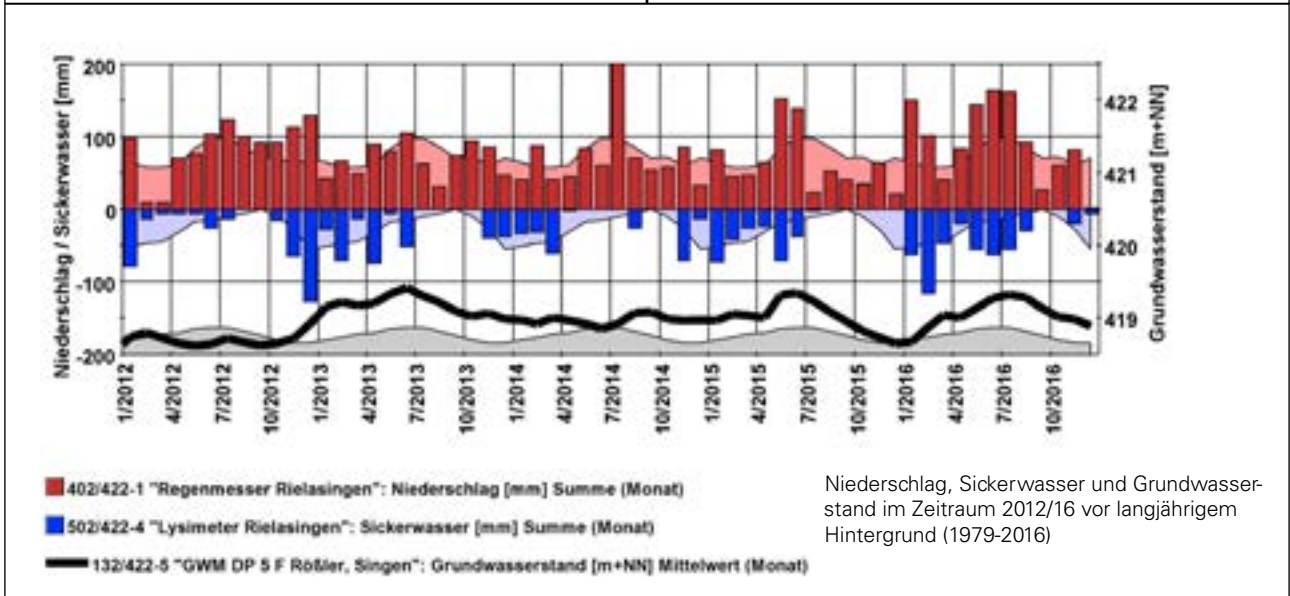
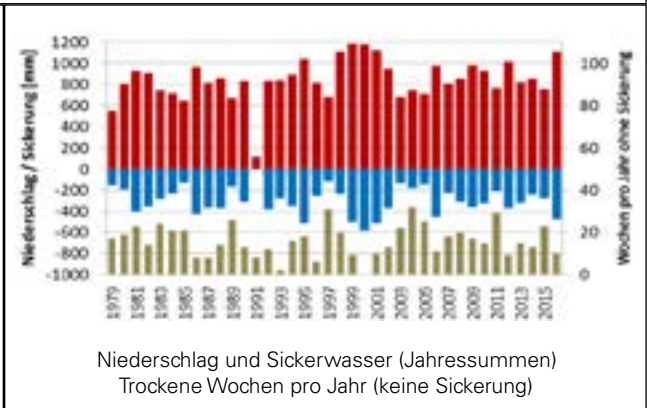
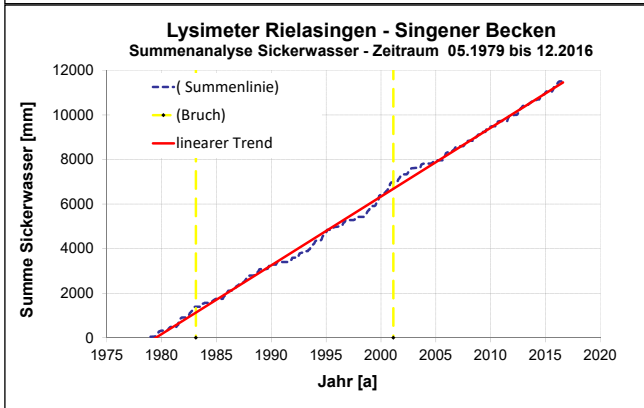
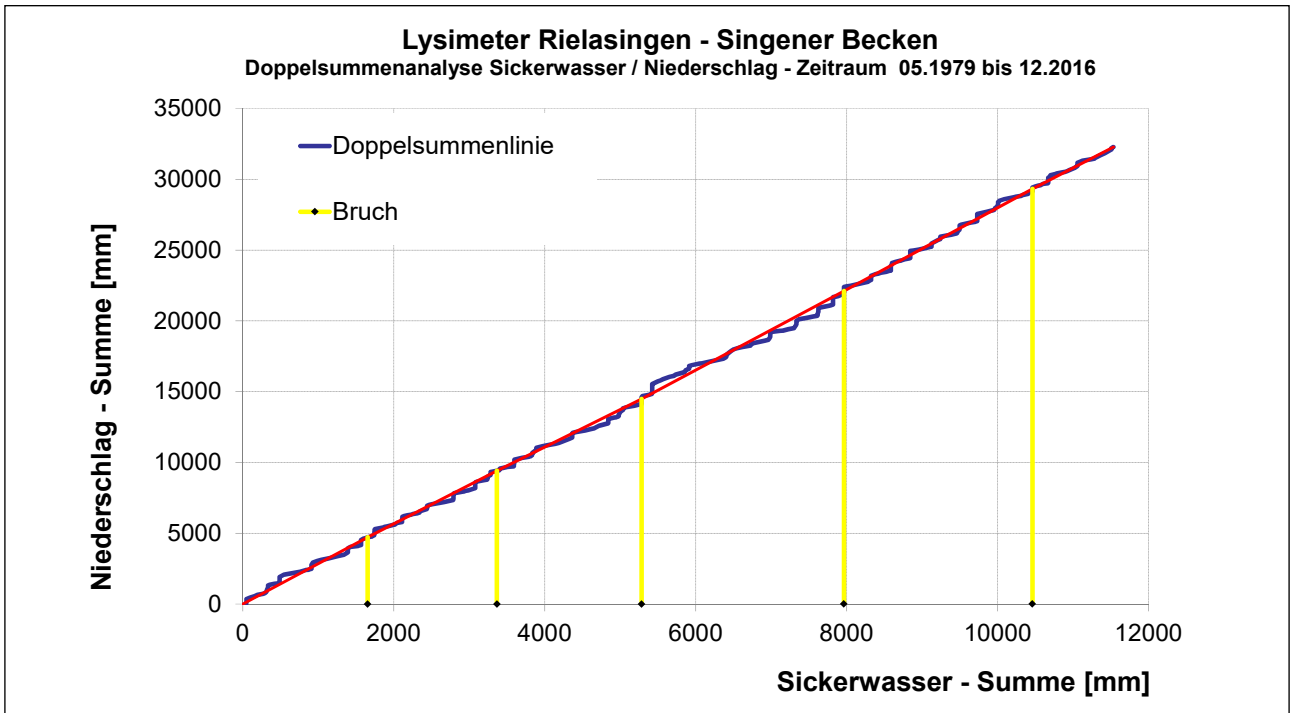
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Niederschlagsmessgerät, Kontrollschacht und Auffangbehälter des Lysimeters befinden sich auf Pumpwerksgelände.



Eckdaten (Zeitraum 1980-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	858 mm	Sickerwasser:	308 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 36%		Sommerhalbjahr: 12%	Winterhalbjahr: 69%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	17	Maximum: 32 Wochen (2004) Minimum: 0 Wochen (2000)		

Lysimeteranlage Sandhausen

Niederschlagsmessstelle: 0403/306-6
 Sickerwassermessstelle: 0503/306-9
 Referenzgrundwassermessstelle: 0127/306-2

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	vermutlich ungestört
Bodenüberdeckung:	0,14 m	Geländehöhe:	104,42 m+NN
Bodentyp:	Mittel- und Feinsand	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Hardtebenen	Inbetriebnahme:	21.12.1972
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann ohne Windschutz
 Entfernung GW-Messstelle: 1.100 m
 Mittlerer Flurabstand: 5,1 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



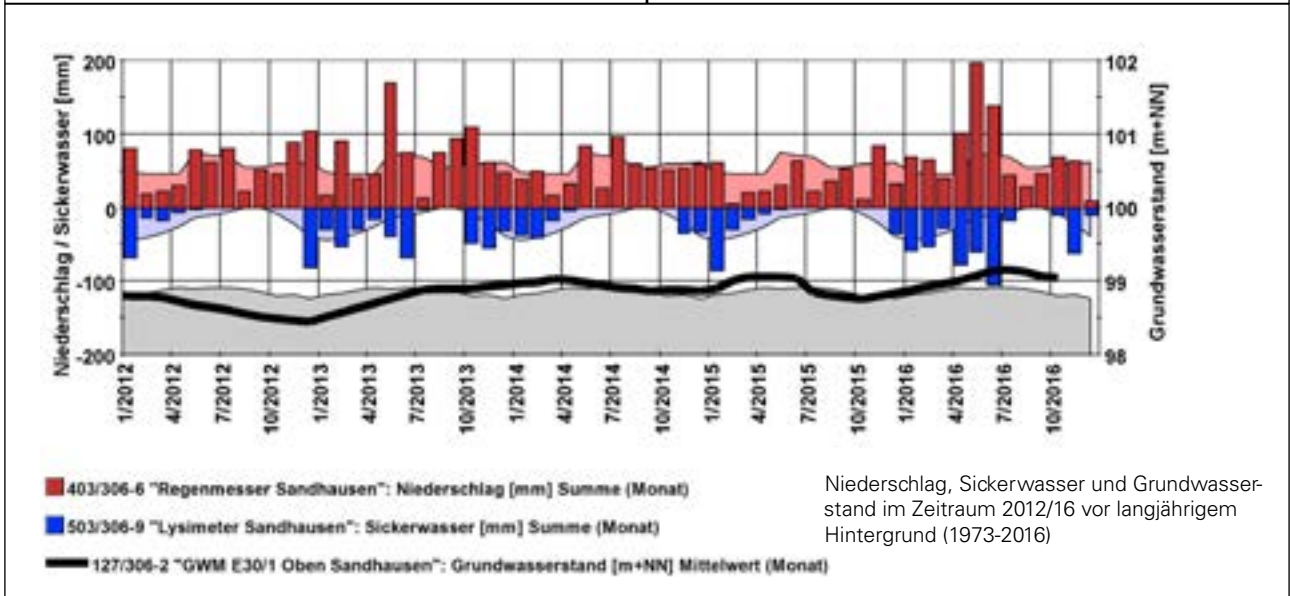
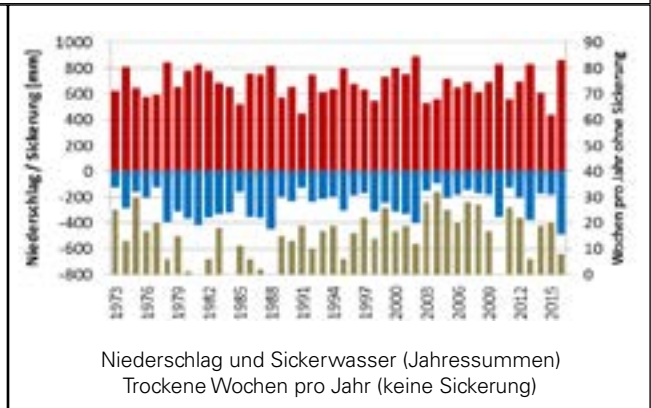
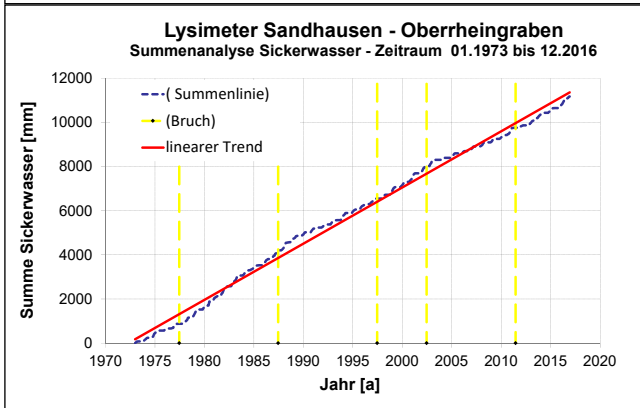
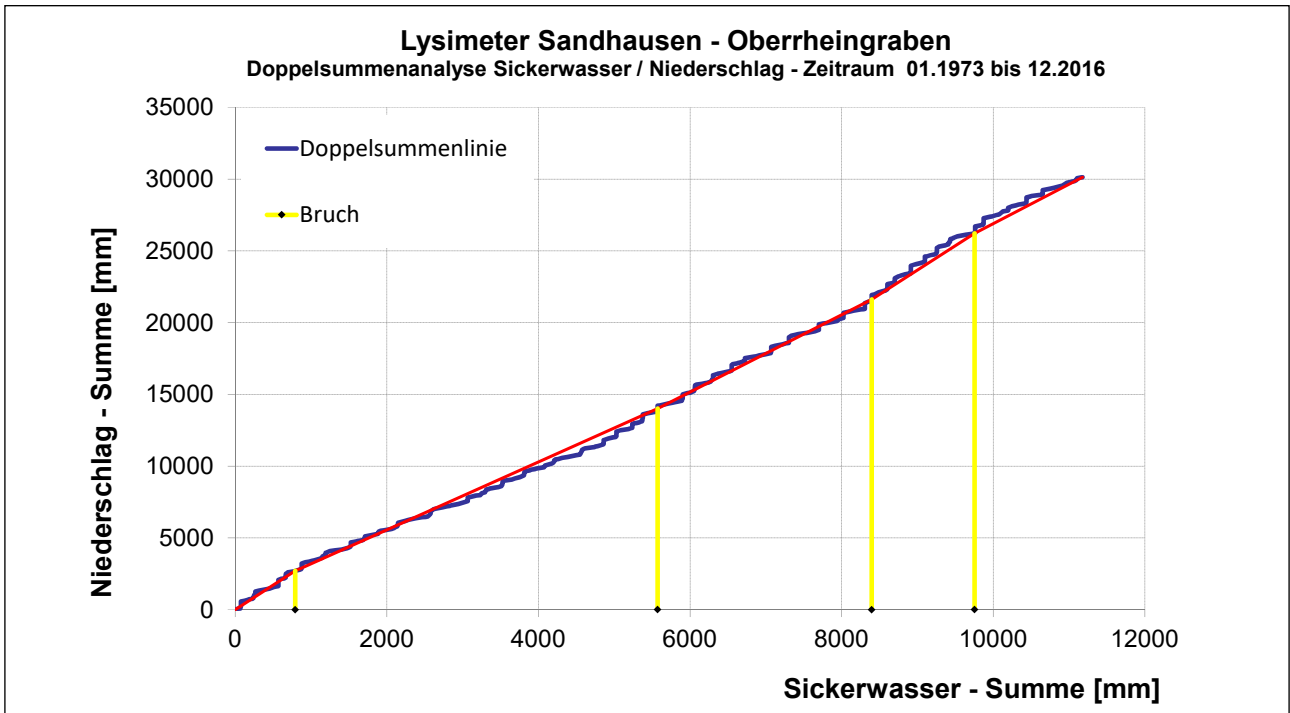
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Niederschlagsmessgerät, Kontrollschacht und Auffangbehälter des Lysimeters befinden sich auf Pumpwerksgelände.



Eckdaten (Zeitraum 1973-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	685 mm	Sickerwasser:	254 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 37%		Sommerhalbjahr:	12%
			Winterhalbjahr:	70%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	15	Maximum:	32 Wochen (2004)	
		Minimum:	0 Wochen (in 4 von 44 Jahren)	

Lysimeteranlage Sankt Georgen

Niederschlagsmessstelle: 0400/070-5
Sickerwassermessstelle: 0500/070-3
Referenzgrundwassermessstelle: 0102/070-7

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	vermutlich Monolith
Bodenüberdeckung:	0,40 m	Geländehöhe:	227,8 m+NN
Bodentyp:	nicht bekannt	Landnutzung:	Ackerland
Naturraum:	Freiburger Bucht	Inbetriebnahme:	14.06.1975
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 1.560 m
Mittlerer Flurabstand: 2,5 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



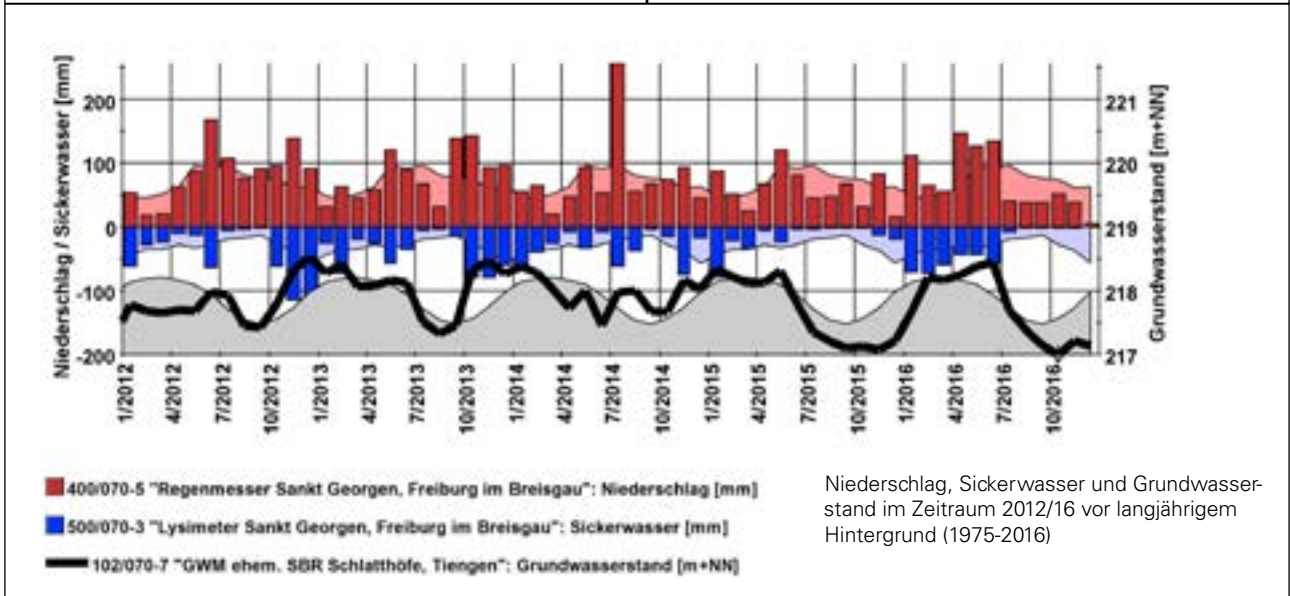
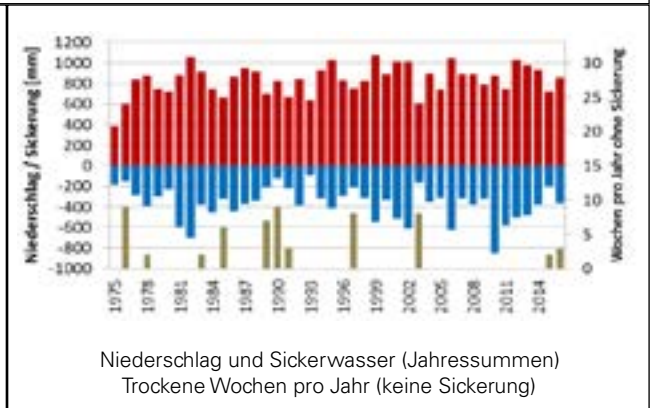
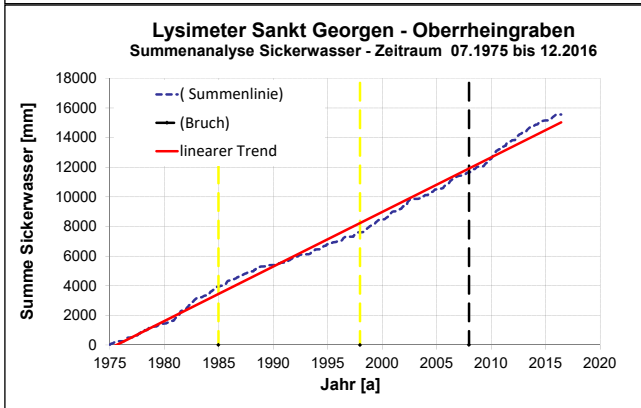
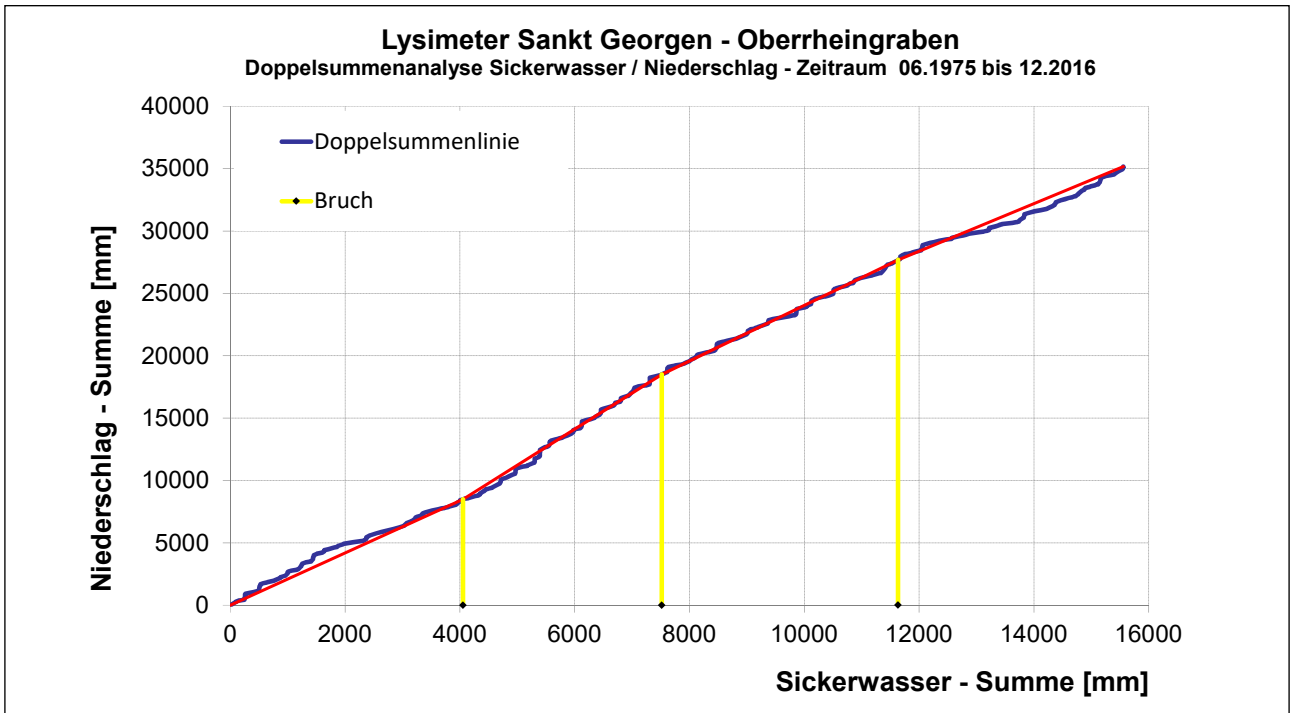
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Die Windschutzvorrichtung des Regenmessers wurde im Jahr 1986 und der Edelstahlauflauf des Kontrollschachts im Jahr 2014 installiert. Geländearbeiten im Bereich des Lysimetertopfs haben im Herbst 2010 die Einsickerung von Oberflächenwasser begünstigt.



Eckdaten (Zeitraum 1976-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	848 mm	Sickerwasser:	375 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 44%		Sommerhalbjahr: 26%	Winterhalbjahr: 72%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	1	Maximum: 9 Wochen (1976, 1990)	Minimum: 0 Wochen (in 31 von 42 Jahren)	

Lysimeteranlage Schriesheim

Niederschlagsmessstelle: 0400/305-7

Sickerwassermessstelle: 0500/305-3

Referenzgrundwassermessstelle: 0107/305-0

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	Ungestört (Monolith)
Bodenüberdeckung:	ebenerdig	Geländehöhe:	105,15 m+NN
Bodentyp:	Feinkies und Sand	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Neckar - Rheinebene	Inbetriebnahme:	02.01.1973
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp:	Hellmann ohne Windschutz
Entfernung GW-Messstelle:	1.600 m
Mittlerer Flurabstand:	11 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



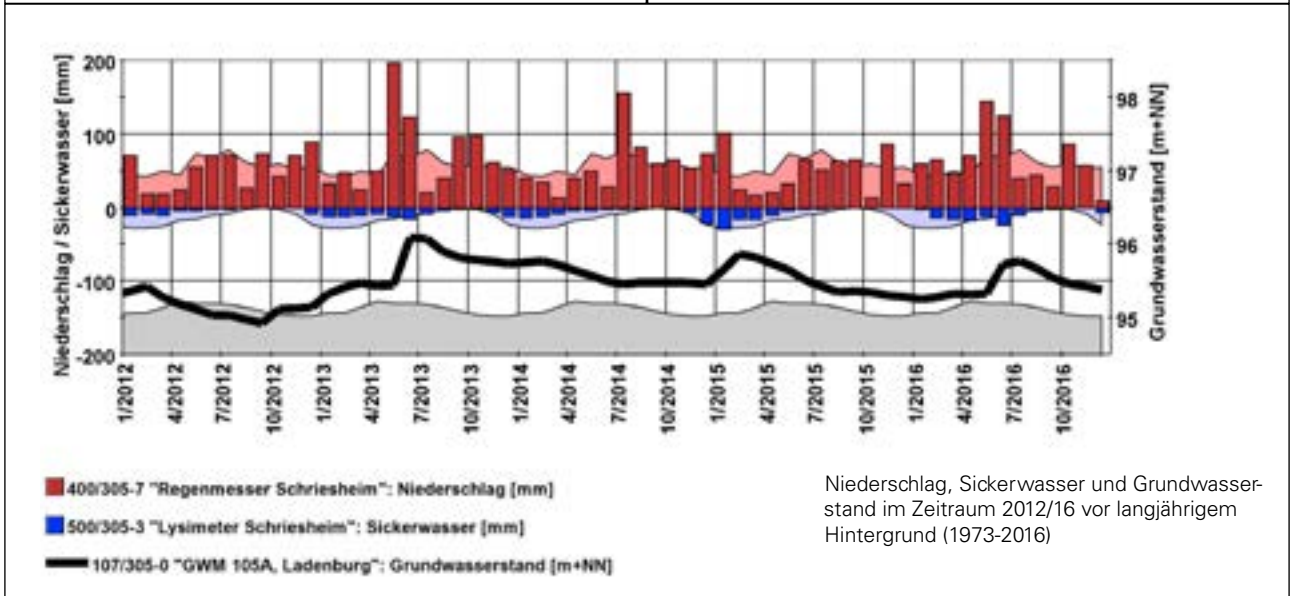
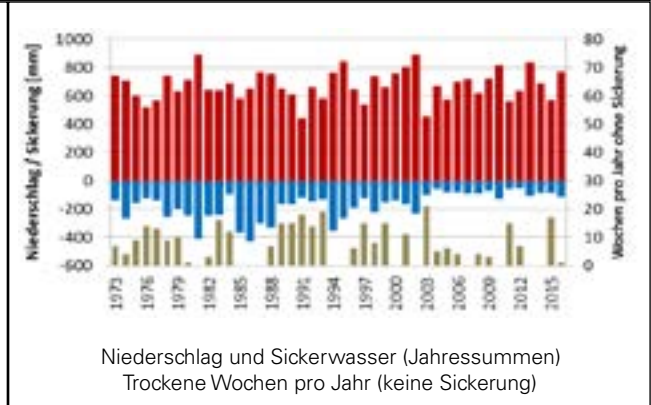
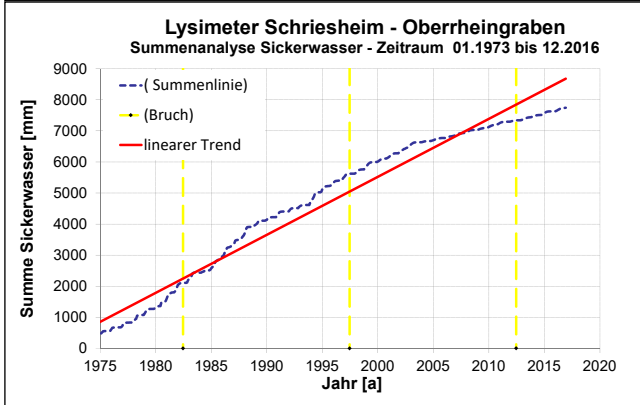
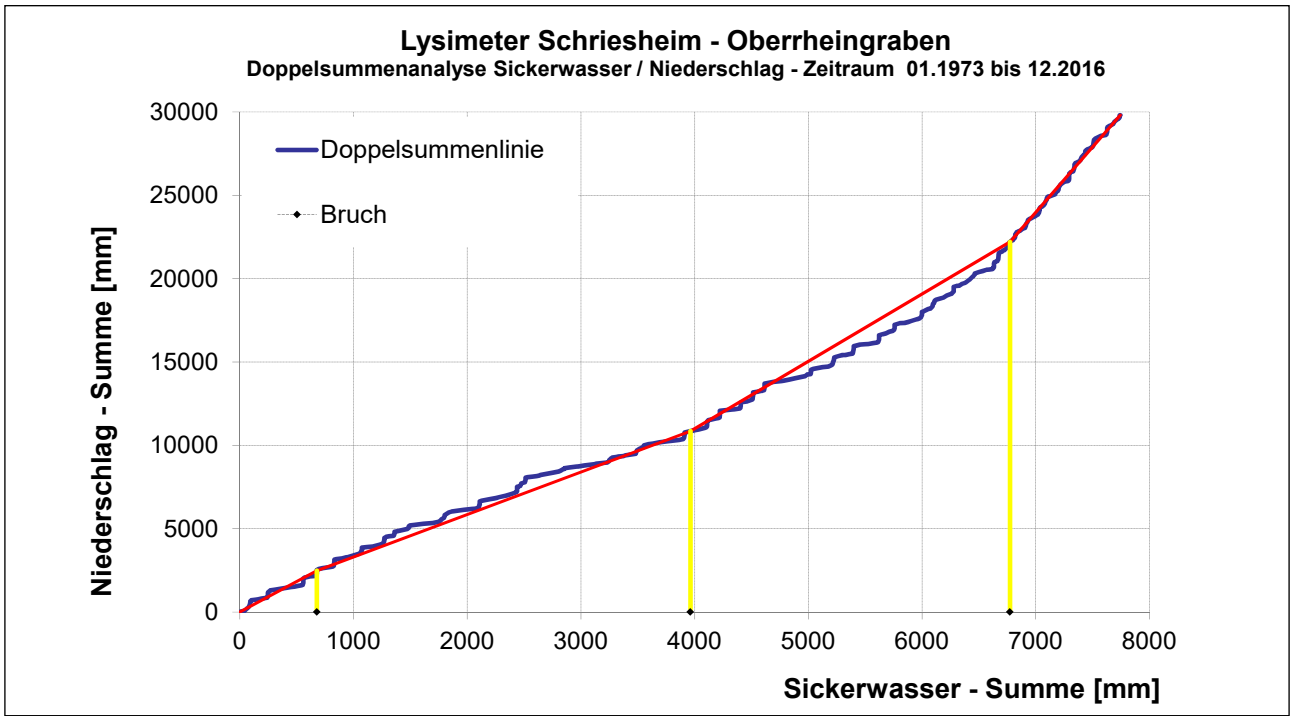
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Der Sickerwasseranteil seit 2003 ist in Anbetracht des leichten Bodentyps untypisch gering. Bodenverdichtungen sind auf diesem Wasserwerksgelände eher unwahrscheinlich.



Eckdaten (Zeitraum 1973-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	677 mm	Sickerwasser:	176 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 26%		Sommerhalbjahr: 26%	Winterhalbjahr: 72%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	7	Maximum: 21 Wochen (2003) Minimum: 0 Wochen (in 12 von 44 Jahren)		

Lysimeteranlage Schwarzach

Niederschlagsmessstelle: 0400/162-1
Sickerwassermessstelle: 0500/162-4
Referenzgrundwassermessstelle: 0157/162-8

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	Monolith (ungestört)
Bodenüberdeckung:	0,43 m	Geländehöhe:	128,47 m+NN
Bodentyp:	Schluffiger Feinsand	Landnutzung:	Ackerland
Naturraum:	Hardtebenen	Inbetriebnahme:	02.12.1963
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp:	Hellmann ohne Windschutz
Entfernung GW-Messstelle:	850 m
Mittlerer Flurabstand:	6 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



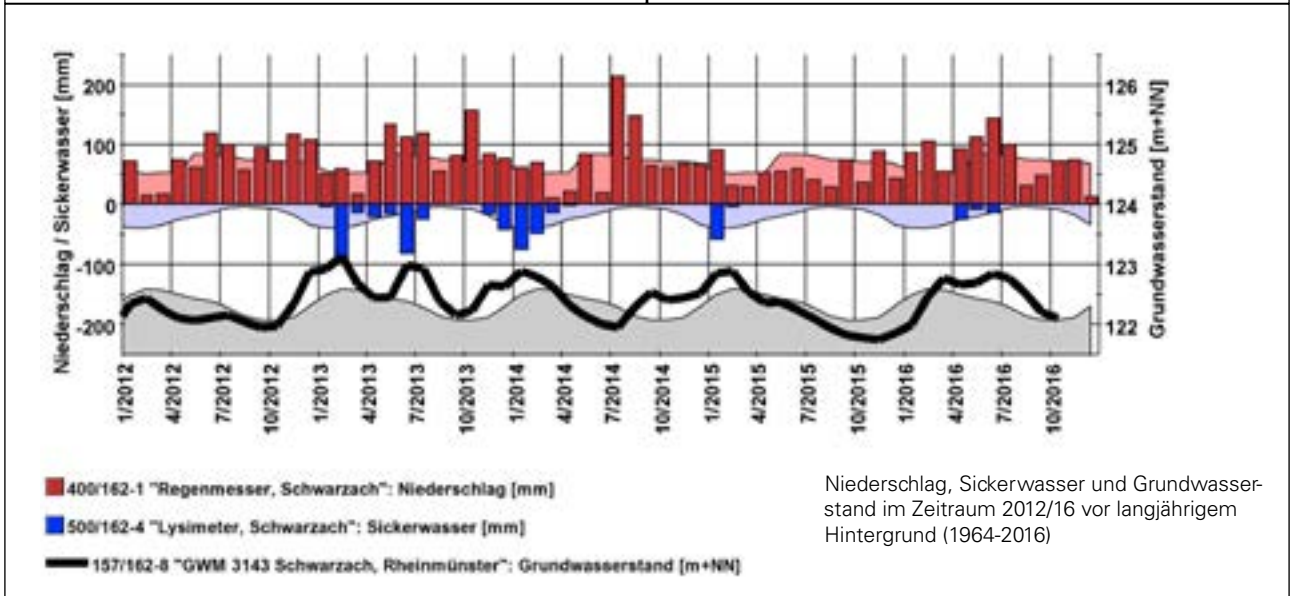
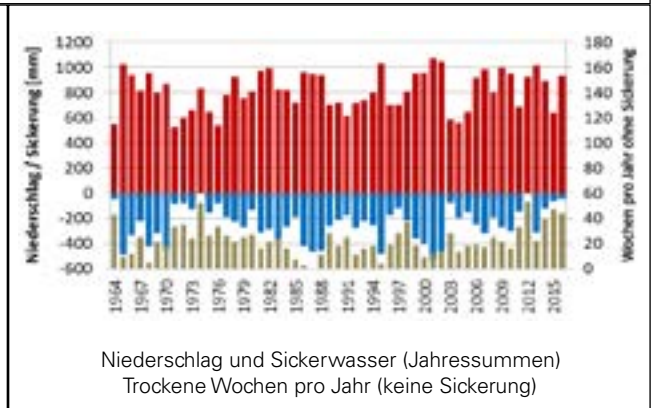
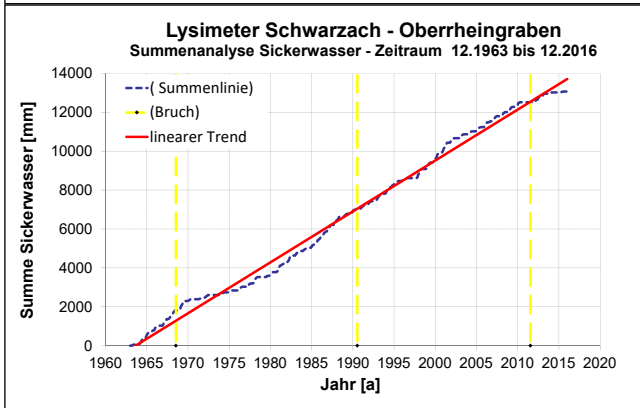
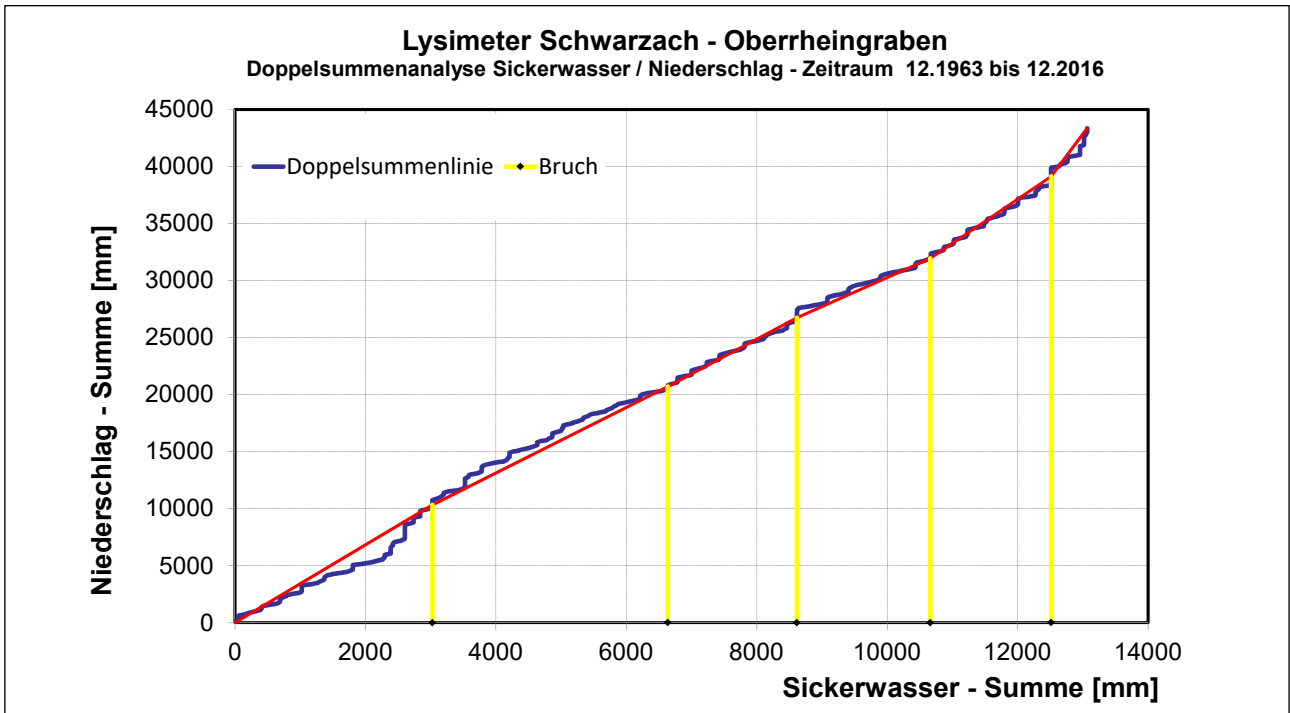
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Der Kontrollschacht der Lysimeteranlage Schwarzach ist auf einem Wasserwerkgelände zugänglich. Der Lysimeterbehälter wurde unter der anliegenden Ackerfläche eingebaut. Die Sickerung blieb in den Jahren 1974 und 2012 aus. Die Versickerungsrate nimmt seit etwa 2010 ab.



Eckdaten (Zeitraum 1964-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	818 mm	Sickerwasser:	247 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 30%		Sommerhalbjahr: 26%	Winterhalbjahr: 72%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	22	Maximum: 52 Wochen (1974, 2012) Minimum: 0 Wochen (1987)		

Lysimeteranlage Steißlingen

Niederschlagsmessstelle: 0400/422-0
Sickerwassermessstelle: 0500/422-5
Referenzgrundwassermessstelle: 0132/422-5

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	vermutlich ungestört
Bodenüberdeckung:	0,30 m	Geländehöhe:	432,85 m+NN
Bodentyp:	Braunerde aus Schottern	Landnutzung:	Acker, Wiese (´86)
Naturraum:	Bodensee	Inbetriebnahme:	01.05.1979
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 5.000 m
Mittlerer Flurabstand: ca. 15 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



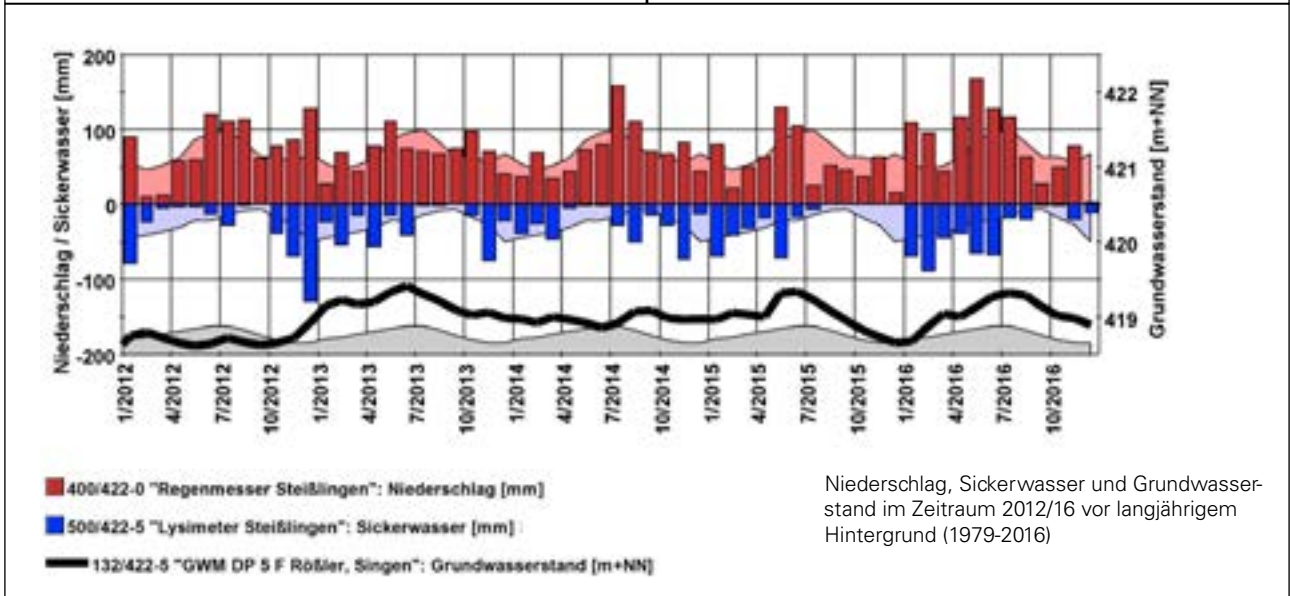
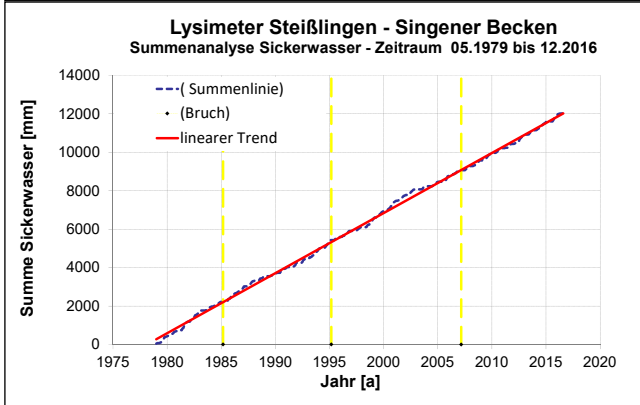
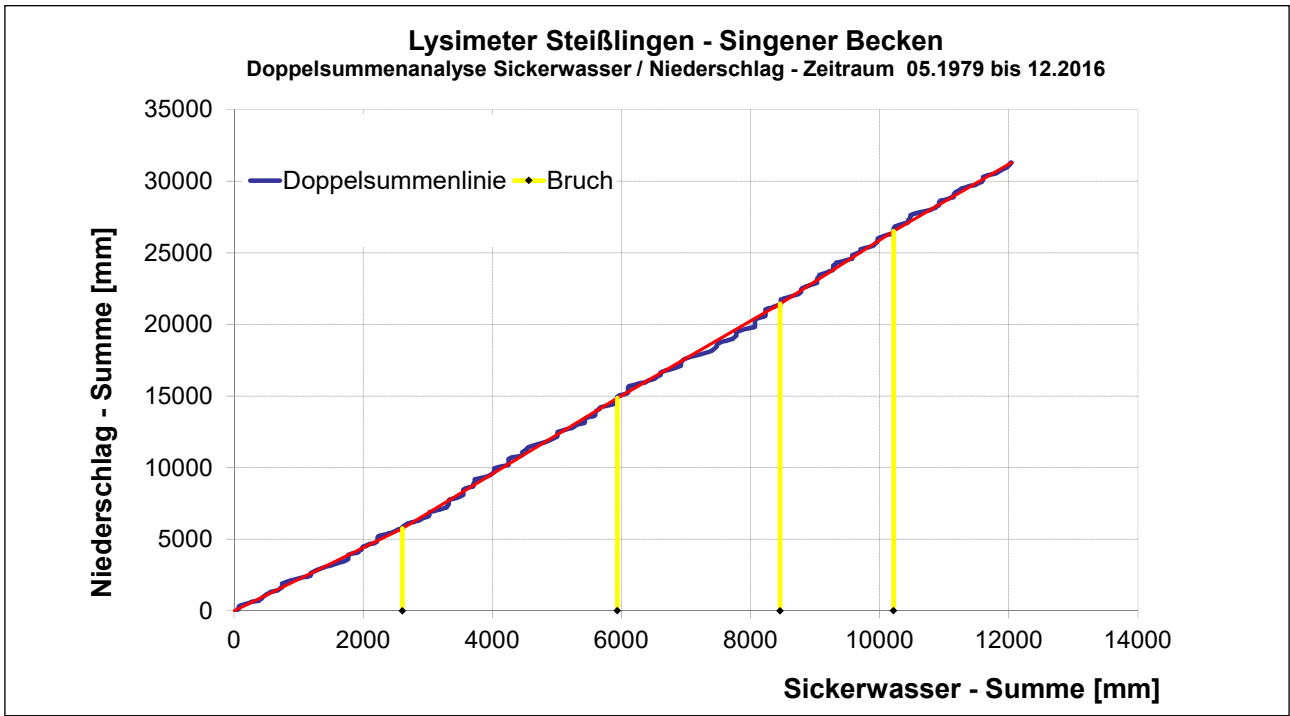
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Das Lysimeter ist frei zugänglich. Das Sickerverhalten bzw. die Sickerraten sind im gesamten Beobachtungszeitraum sehr stabil.



Eckdaten (Zeitraum 1980-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	831 mm	Sickerwasser:	319 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 38%		Sommerhalbjahr:	18%
			Winterhalbjahr:	68%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	12	Maximum:	30 Wochen (2003)	
		Minimum:	0 Wochen (1980, 1986)	

Lysimeteranlage Tännelèsäcker

Niederschlagsmessstelle: 0400/769-8

Sickerwassermessstelle: 0500/769-5

Referenzgrundwassermessstelle: 0193/769-2

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	gestört
Bodenüberdeckung:	ca. 0,30 m	Geländehöhe:	ca. 553,5 m+NN
Bodentyp:	sandig schluffiger Kies	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Holzstöcke	Inbetriebnahme:	02.08.1979
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp:	Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle:	50 m
Mittlerer Flurabstand:	6,8 m

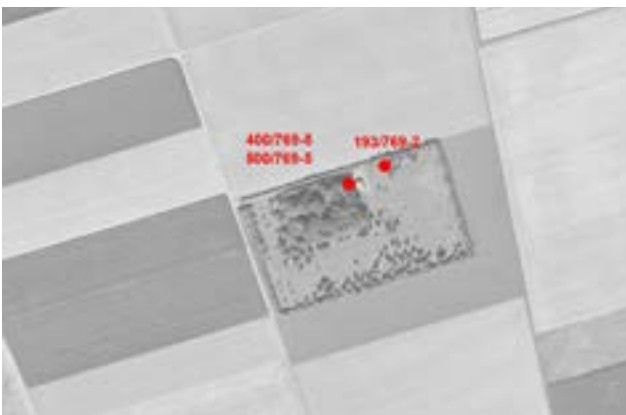
Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



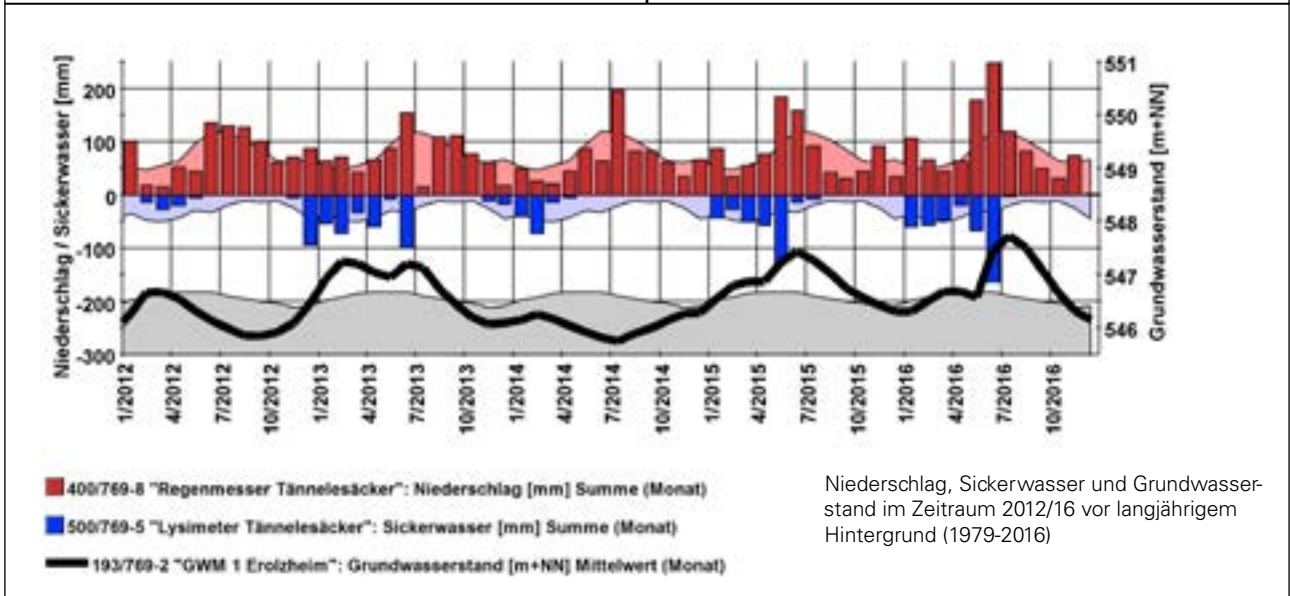
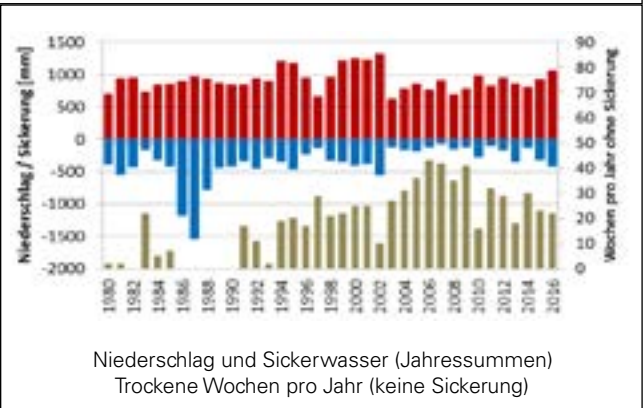
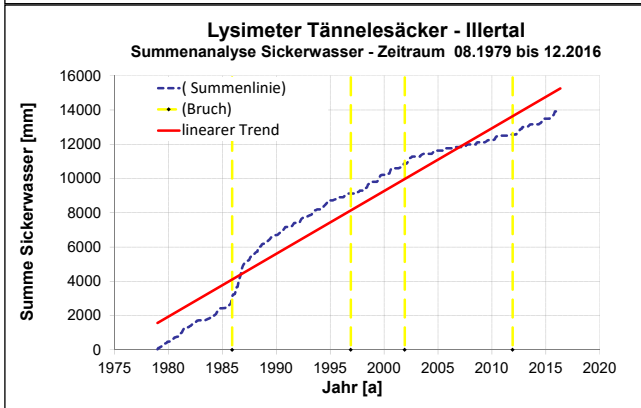
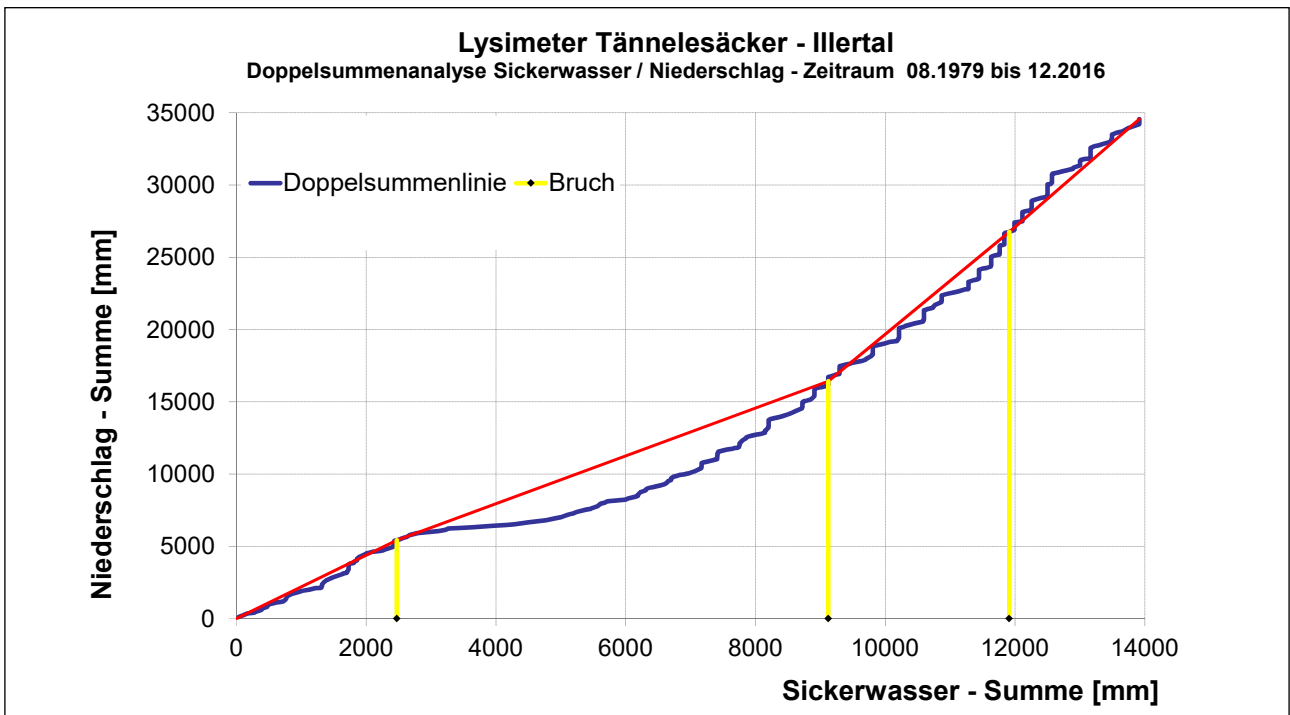
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Das Lysimeter befindet sich auf Wasserwerksgelände. Im Zuge einer Baumaßnahme wurde in den Jahren 1986/87 Niederschlagswasser in den Bereich des Lysimeterbehälters abgeleitet. Die Fremdwasserzutritte sind in den statistischen Auswertungen deutlich sichtbar.



Eckdaten (Zeitraum 1980-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	924 mm	Sickerwasser:	371 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 40%		Sommerhalbjahr:	21%
			Winterhalbjahr:	72%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	18	Maximum:	43 Wochen (2006)	
		Minimum:	0 Wochen (in 6 von 38 Jahren)	

Lysimeteranlage Unterzeil

Niederschlagsmessstelle: 0400/771-0

Sickerwassermessstelle: 0500/771-9

Referenzgrundwassermessstelle: 0100/721-0

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	ungestört (Monolith)
Bodenüberdeckung:	ebenerdig	Geländehöhe:	639,80 m+NN
Bodentyp:	Schluff über sandigem Kies	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Donau-Ablach-Platten	Inbetriebnahme:	01.07.1977
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp:	Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle:	2.100 m
Mittlerer Flurabstand:	11,5 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



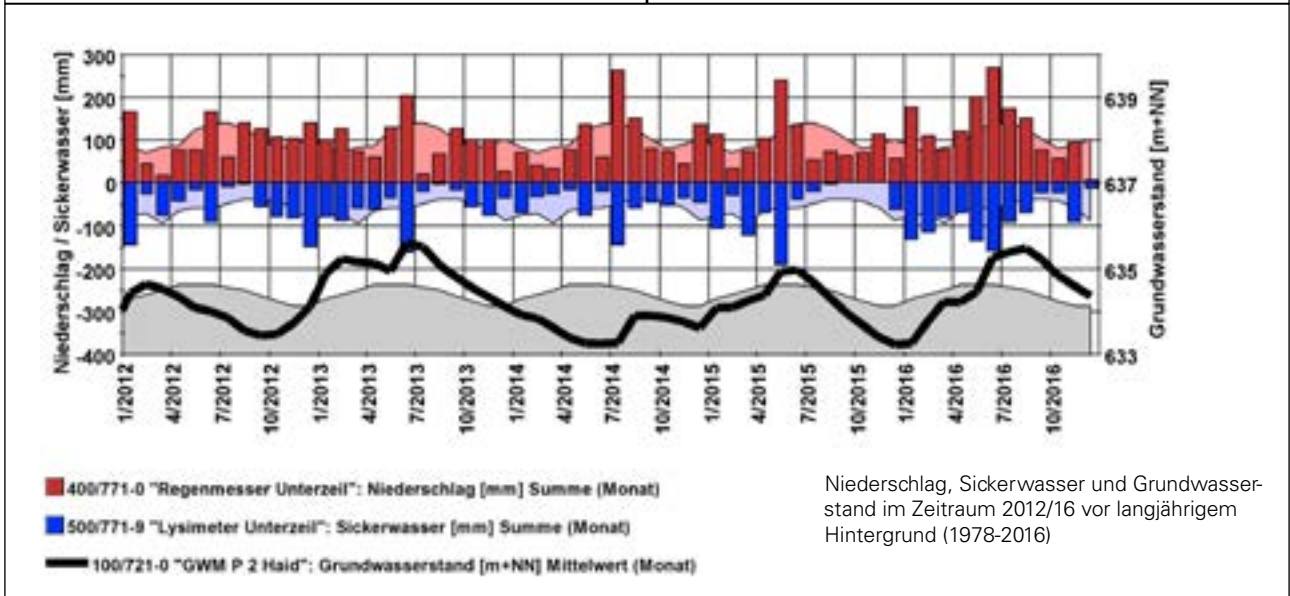
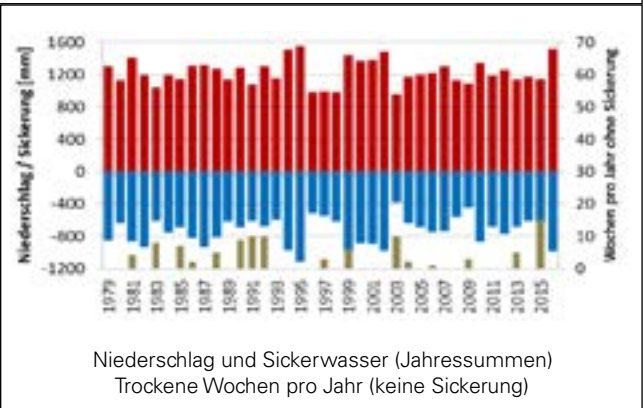
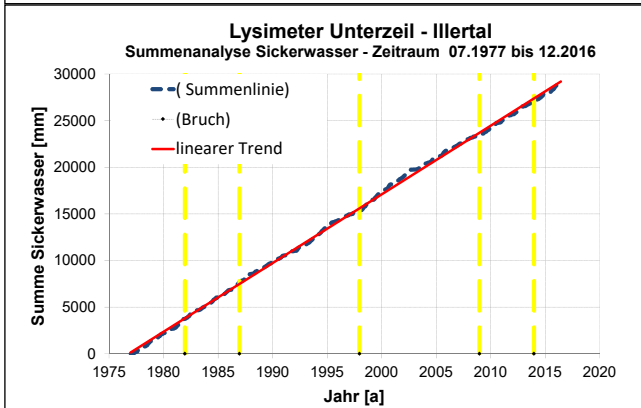
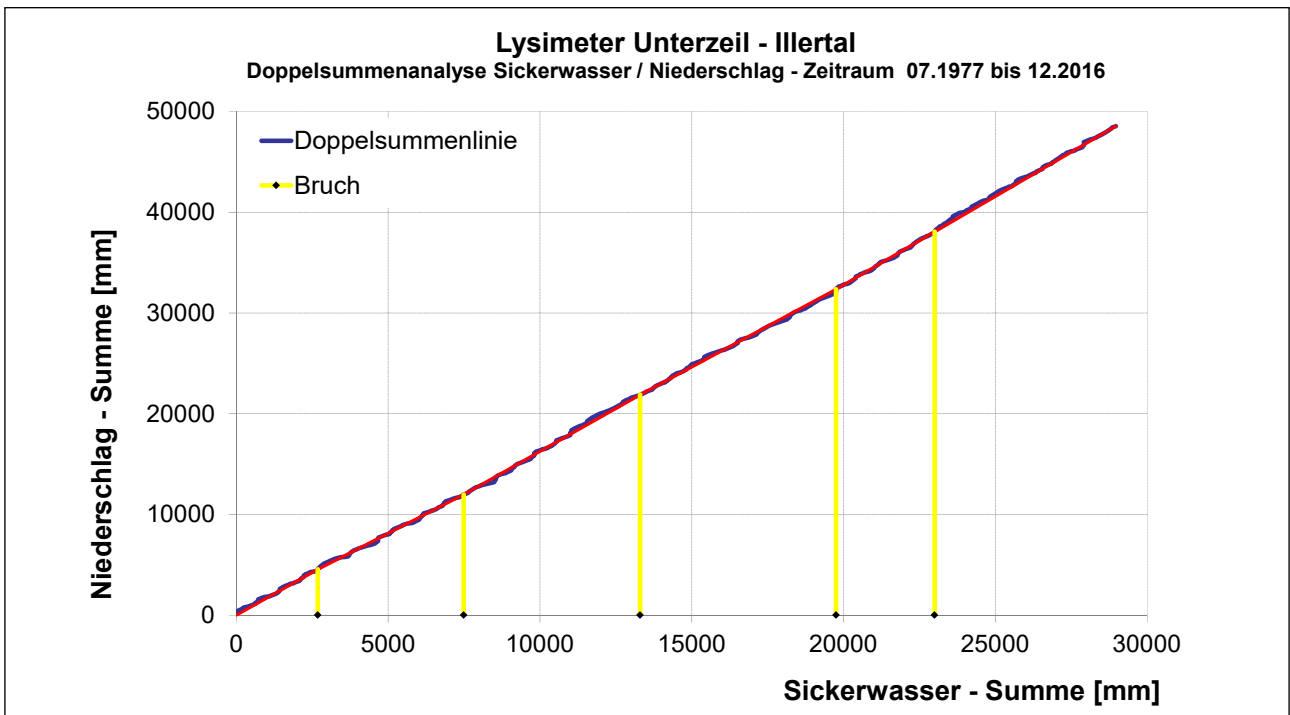
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Die Lysimeteranlage liegt auf dem Randstreifen einer wenig befahrenen Straße, wird jedoch nicht durch Straßenabwässer beeinträchtigt.



Eckdaten (Zeitraum 1978-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	1.230 mm	Sickerwasser:	738 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 60%		Sommerhalbjahr: 40%	Winterhalbjahr: 87%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	3	Maximum: 15 Wochen (2015) Minimum: 0 Wochen (in 23 von 39 Jahren)		

Lysimeteranlage Vörstetten

Niederschlagsmessstelle: 0400/069-6
Sickerwassermessstelle: 0500/069-7
Referenzgrundwassermessstelle: 0124/119-0

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	vermutlich Monolith
Bodenüberdeckung:	ca. 0,50 m	Geländehöhe:	ca. 203 m+NN
Bodentyp:	Feinsandiger Schluff	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Freiburger Bucht	Inbetriebnahme:	10.04.1975
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp: Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle: 4.700 m
Mittlerer Flurabstand: 3 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



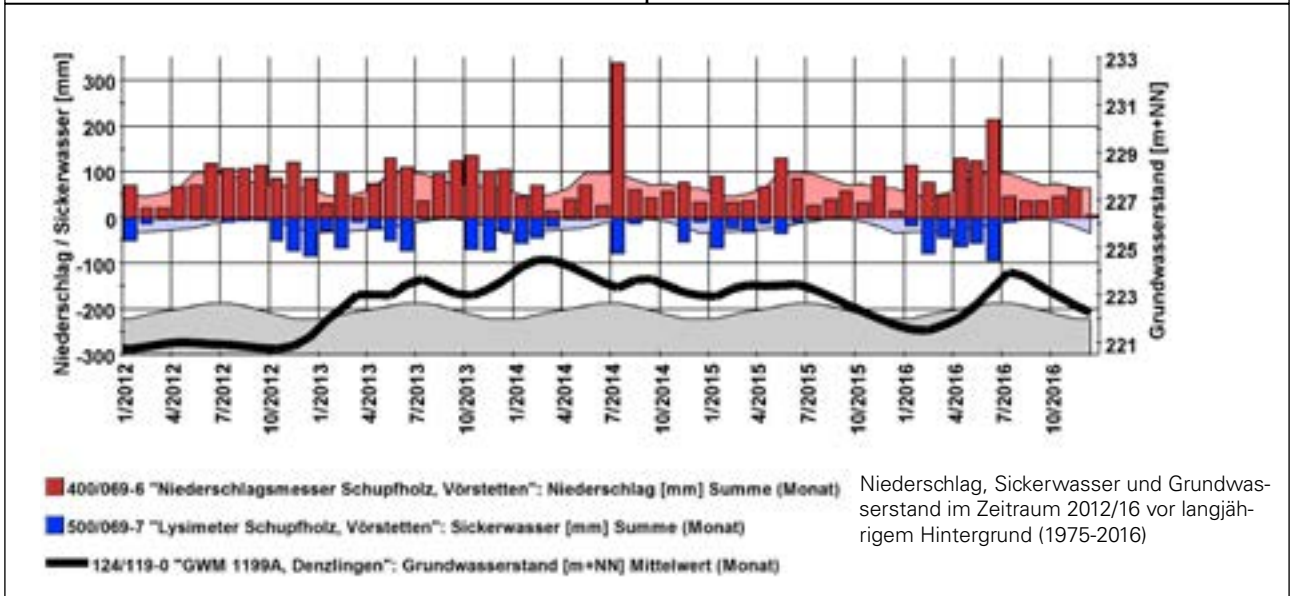
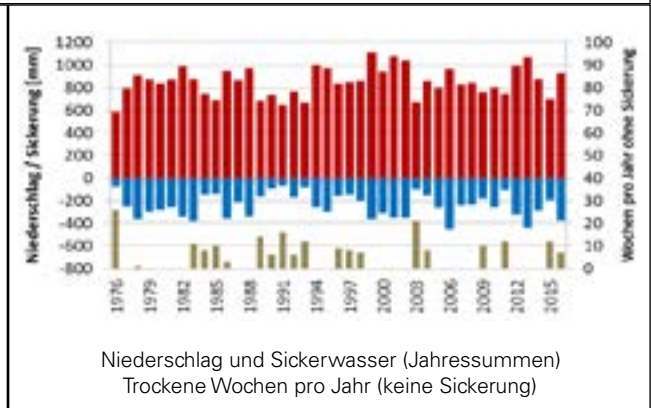
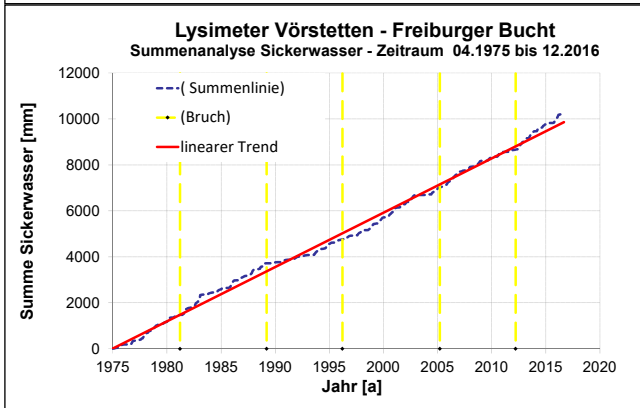
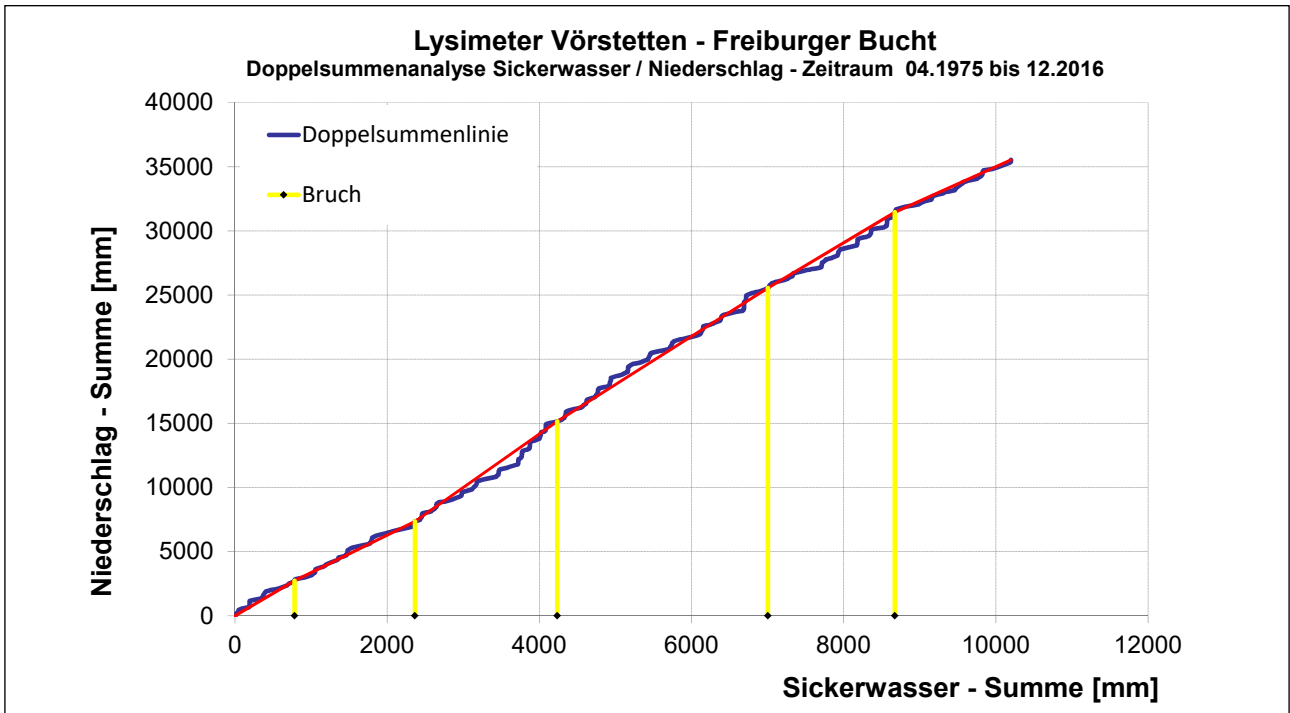
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Lysimeterkontrollschacht und Regenmesser sind frei zugänglich auf einer Wiese.



Eckdaten (Zeitraum 1975-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	853 mm	Sickerwasser:	246 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 29%		Sommerhalbjahr:	14%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	5	Maximum:	26 Wochen (1976)	
		Minimum:	0 Wochen (in 25 von 42 Jahren)	

Lysimeteranlage Weinheim Bauhof - stillgelegt

Niederschlagsmessstelle: 0400/304-4

Sickerwassermessstelle: 0500/304-1

Referenzgrundwassermessstelle: 0142/304-7

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	gestört
Bodenüberdeckung:	ebenerdig	Geländehöhe:	ca. 97,5 m+NN
Bodentyp:	Feinkies und Sand	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Hessische Rheinebene	Inbetriebnahme:	01.12.1972
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande	Stilllegung:	29.07.2011

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp:	Hellmann ohne Windschutz
Entfernung GW-Messstelle:	1.700 m
Mittlerer Flurabstand:	3 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



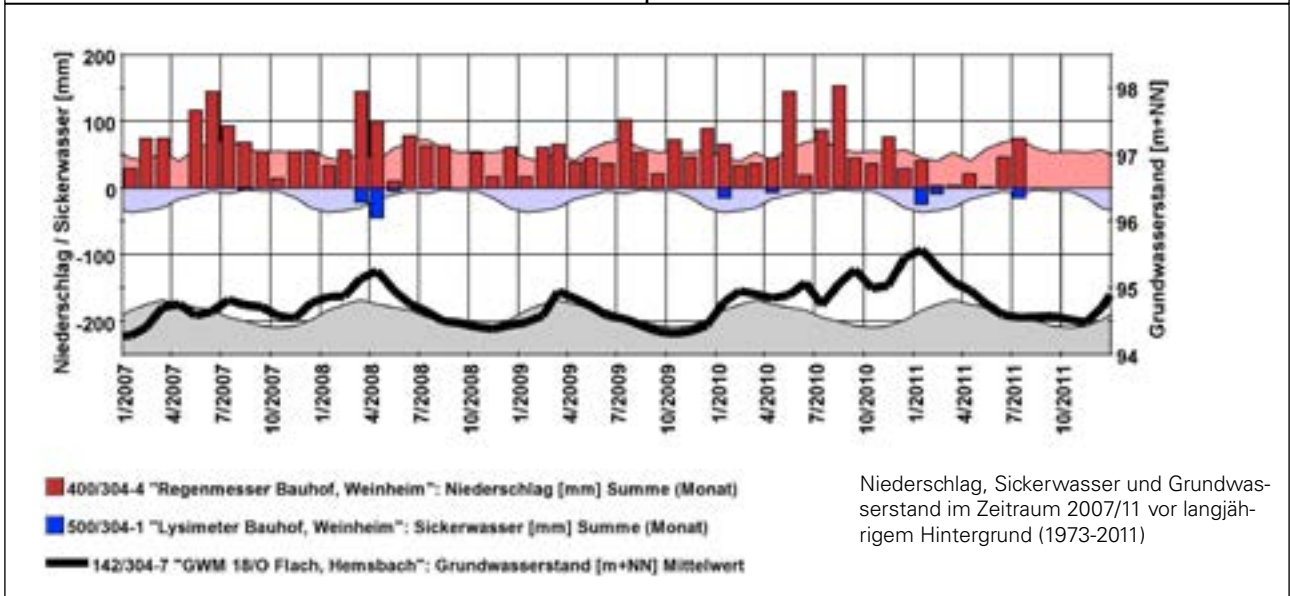
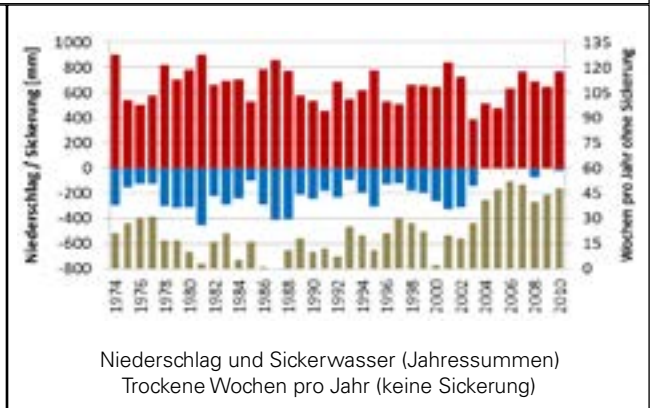
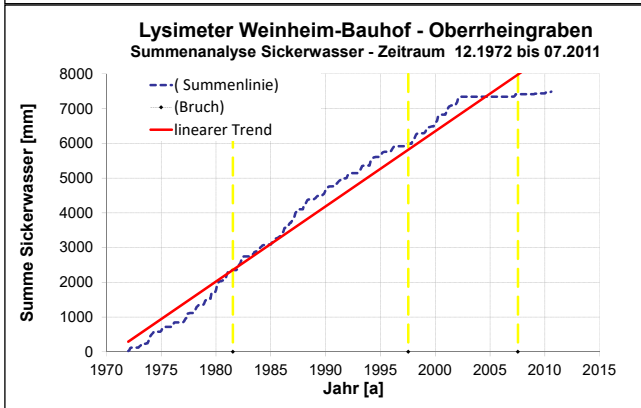
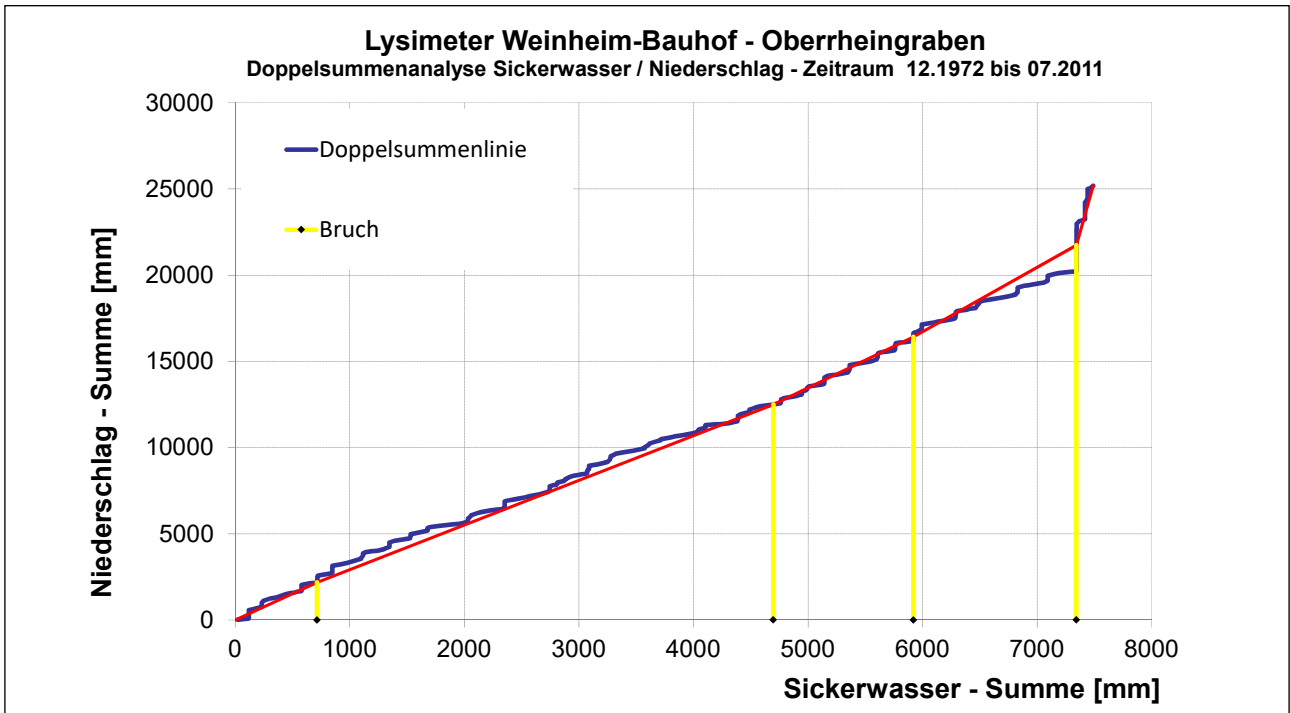
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Lysimeterbehälter und Regenmesser waren unmittelbar durch Bäume im Westen beeinflusst, wodurch zu geringe Wassermengen beobachtet wurden. Das Lysimeter war von 2004 bis 2007 trocken und wurde im Juli 2011 wegen unplausibler (geringer) Sickerung stillgelegt.



Eckdaten (Zeitraum 1974-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	663 mm	Sickerwasser:	196 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 30%		Sommerhalbjahr:	Winterhalbjahr:
			10%	54%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	23	Maximum:	52 Wochen (2006)	
		Minimum:	0 Wochen (1987)	

Lysimeteranlage Weisweil

Niederschlagsmessstelle: 0400/068-3

Sickerwassermessstelle: 0500/068-5

Referenzgrundwassermessstelle: 0133/068-0

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	vermutlich Monolith
Bodenüberdeckung:	ca. 0,50 m	Geländehöhe:	172,50 m+NN
Bodentyp:	Feinsandiger Schluff	Landnutzung:	Ackerland
Naturraum:	Offenburger Rheinebene	Inbetriebnahme:	12.01.1973
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp:	Hellmann mit Windschutz
Entfernung GW-Messstelle:	3.500 m
Mittlerer Flurabstand:	4 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



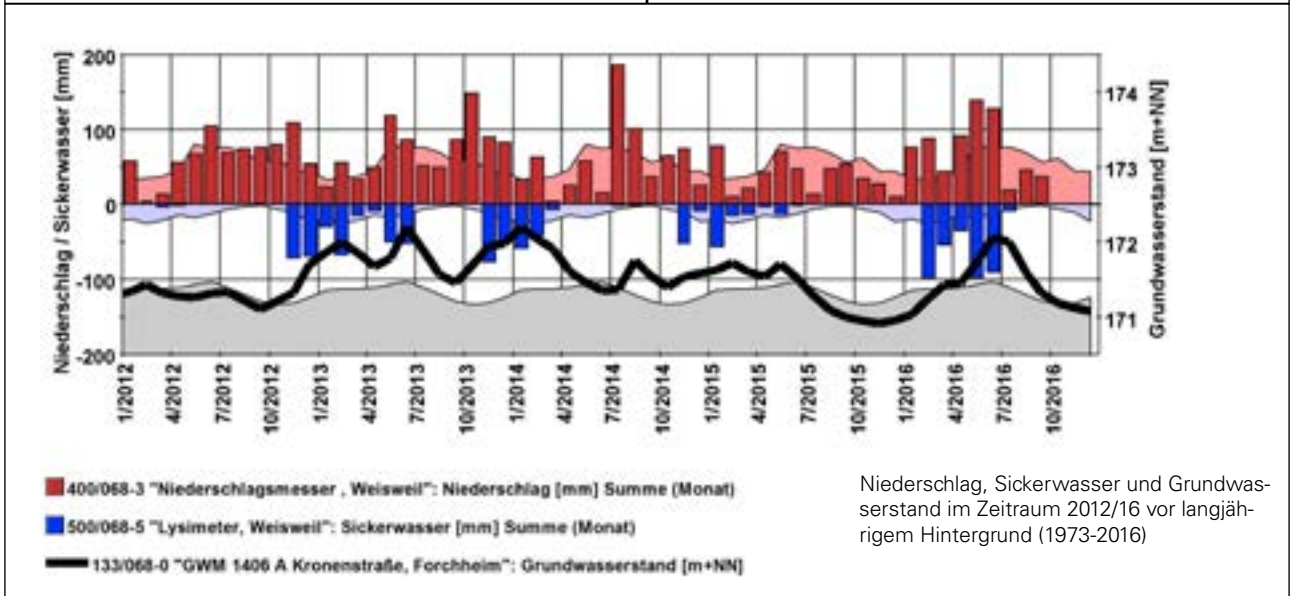
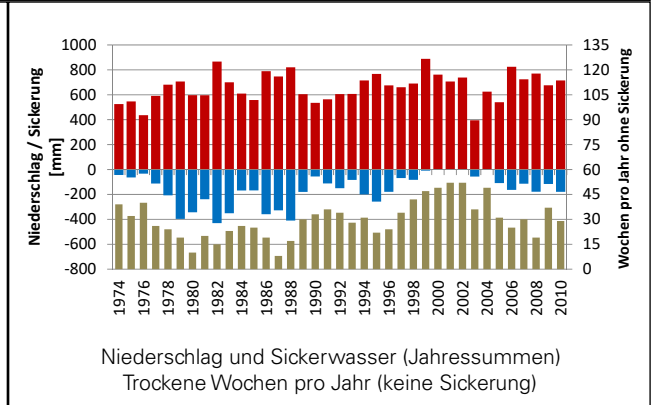
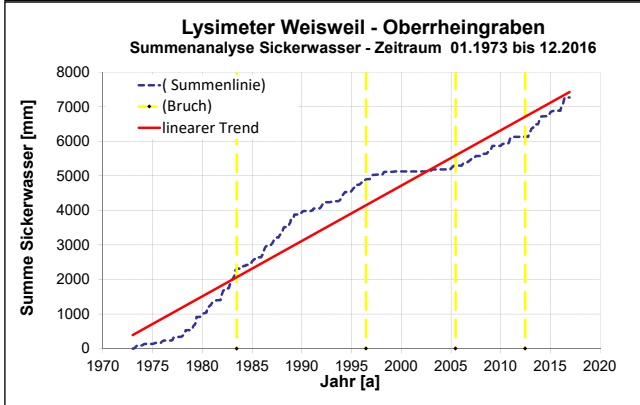
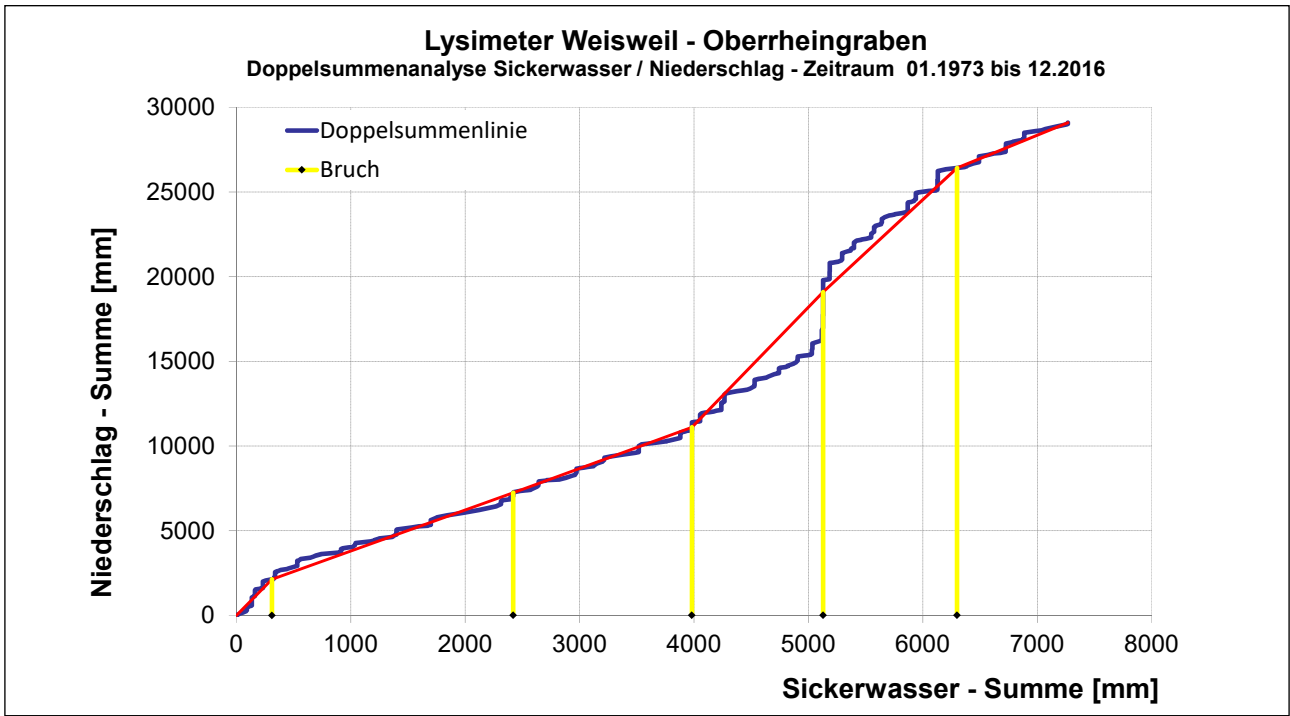
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Der Lysimeterkontrollschacht befindet sich auf Wasserwerksgelände. Eine Strauchhecke reichte von etwa 1995 bis 2005 über den Lysimeterbehälter und bewirkte einen starken Versickerungsrückgang. Der Regenmesser wurde ebenfalls durch diese Hecke beeinflusst.



Eckdaten (Zeitraum 1973-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	661 mm	Sickerwasser:	165 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 25%		Sommerhalbjahr:	12%
			Winterhalbjahr:	48%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	30	Maximum:	52 Wochen (2001, 2002)	
		Minimum:	8 Wochen (1987)	

Lysimeteranlage Willstätt

Niederschlagsmessstelle: 0400/114-9

Sickerwassermessstelle: 0500/114-2

Referenzgrundwassermessstelle: 0108/114-3

Lysimeterbeschreibung:

Lysimetertyp:	Friedrich-Franzen	Bodenkörper:	Monolith (ungestört)
Bodenüberdeckung:	ebenerdig	Geländehöhe:	142,34 m+NN
Bodentyp:	feinsandiger Schluff	Landnutzung:	Dauergrünland
Naturraum:	Offenburger Rheinebene	Inbetriebnahme:	01.09.1963
Aquifereinheit:	quartäre Kiese und Sande		

Lysimeterbeschreibung:

Regenmessertyp:	Hellmann ohne Windschutz
Entfernung GW-Messstelle:	5.500 m
Mittlerer Flurabstand:	2,6 m

Lage:



Übersichtskarte



Detaillageplan (Lysimeter)



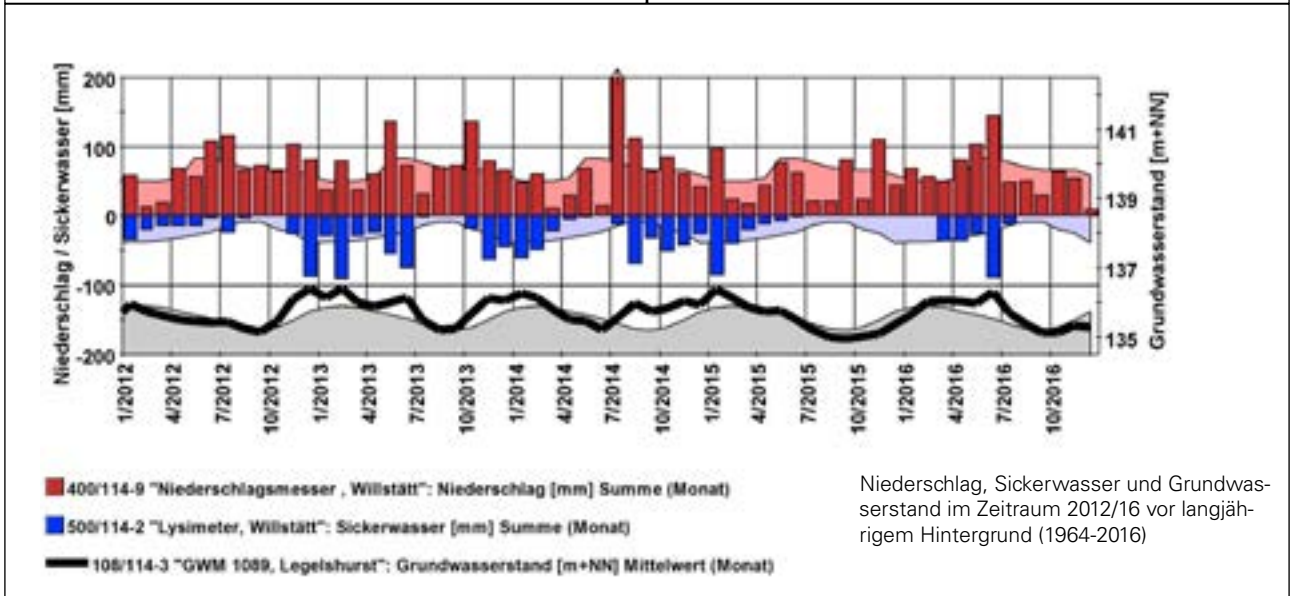
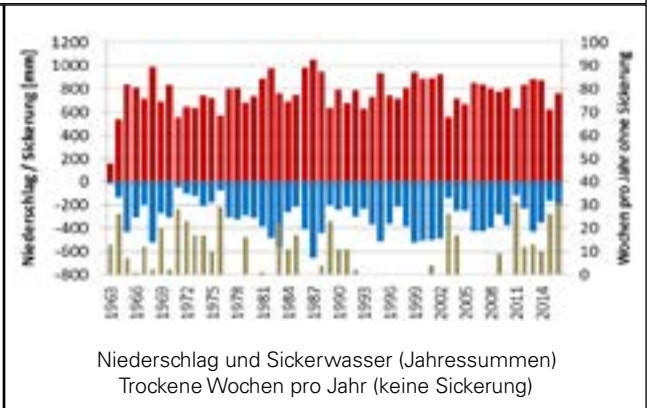
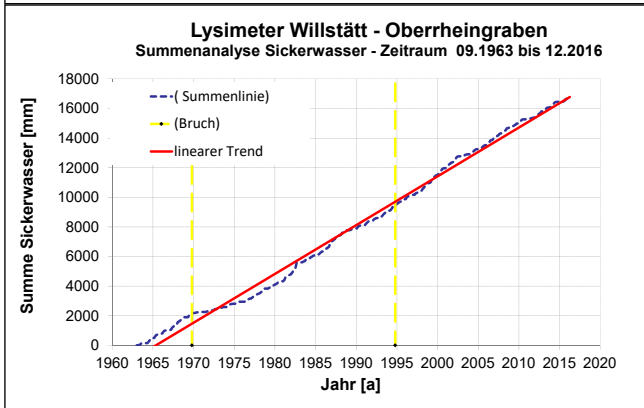
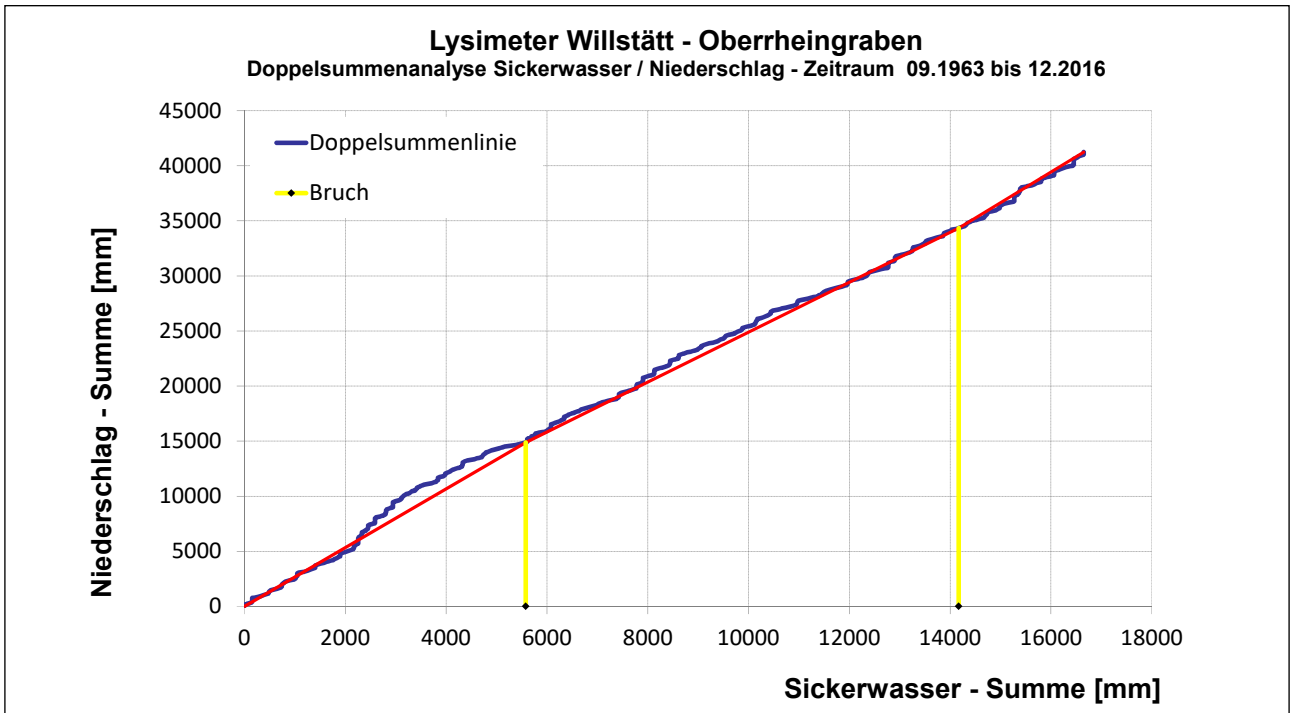
Orthophoto



Messstellenbild (Quelle: LUBW)

Bemerkung:

Die Lysimeteranlage Willstätt wurde am Dammfuß der Kinzig eingerichtet. Sie befindet sich im Wind- und Regenschatten von rd. 20 m hohen Bäumen, die nicht zurück geschnitten werden können (Privateigentum).



Eckdaten (Zeitraum 1964-2016)

Mittlere Jahresmengen:	Niederschlag:	775 mm	Sickerwasser:	314 mm
Verhältnis [Sickerung]/[Niederschlag]	Kalenderjahr: 40%		Sommerhalbjahr:	Winterhalbjahr: 23% 65%
Anzahl der Wochen ohne Sickerung [Wochen/Jahr]	9	Maximum:	31 Wochen (2011, 2016)	
		Minimum:	0 Wochen (in 20 von 54 Jahren)	

Anlage 2: Lysimeterformular



Landesanstalt für Umwelt
Baden-Württemberg

Abteilung Wasser

Lysimeter / -

Beobachter: Regenmesser / -

Anlage in								Monat und Jahr			
Messzeitpunkt		Sickerwasser						Niederschlag			Bemerkungen: Schäden am Gerät etc.
Tag	Uhrzeit	Sickerwasser cm ³	Beeinflussung ¹⁾	Hinweis ²⁾	Bodenbewuchs cm	Schneedecke cm	Niederschlag mm	Beeinflussung ³⁾	Hinweis ⁴⁾		
1.	:										
2.	:										
3.	:										
4.	:										
5.	:										
6.	:										
7.	:										
8.	:										
9.	:										
10.	:										
11.	:										
12.	:										
13.	:										
14.	:										
15.	:										
16.	:										
17.	:										
18.	:										
19.	:										
20.	:										
21.	:										
22.	:										
23.	:										
24.	:										
25.	:										
26.	:										
27.	:										
28.	:										
29.	:										
30.	:										
31.	:										

- 1) **Beeinflussung Sickerwasser:** W = Gelände überflutet R = Bewässerung D = Dünger ausgebracht
E = gemäht, geerntet P = gepflügt, gemulcht
- 2) **Hinweis Sickerwasser:** N = keine Messung U = Messung unsicher K = Messung korrigiert/ergänzt
B = Brache G = Wiese, Gras A = Acker Z = Schmelzwasser
- 3) **Beeinflussung Niederschlag:** R = Bewässerung S = Neuschnee im Regenschirm K = Messung korrigiert/ergänzt
- 4) **Hinweis Niederschlag:** N = keine Messung U = Messung unsicher

