

Ermittlung der Grundwasserneubildung in Schleswig-Holstein mit Hilfe des USDAHL-Modells*)

ERNST F. PREUSS, Kiel

1. Einleitung

Die Expansion von Wirtschaft und Bevölkerung erfordert die Erschließung und Nutzbarmachung bisher ungenutzter Wasserreserven und eine sinnvolle Bewirtschaftung der vorhandenen Mengen. Raumbedeutsame Planungen und Maßnahmen, wie die Anlage von Industrien, Flugplätzen, Wohn- und Erholungsgebieten sowie die Einrichtung von Wasser- und Naturschutzgebieten berühren hydrologische Fragen. So ist bekannt, daß Menge, Qualität und zeitliche Verteilung der Abflüsse und der Grundwasserneubildung in hohem Maße durch die Bodennutzung beeinflusst werden.

Die vorliegende Untersuchung hatte die Ermittlung der Grundwasserneubildung repräsentativer Niederschlagsgebiete unterschiedlicher Bodennutzung im Lande Schleswig-Holstein zum Ziel. Da es kaum möglich ist, alle Wasserhaushaltskomponenten in situ zu messen, wurde zur Ermittlung der Grundwasserneubildung ein mathematisch-hydrologisches Modell angewendet. Mit einem Modell wird ein Maximum an Ähnlichkeit mit der Natur angestrebt. Jedoch läßt sich eine völlige Übereinstimmung nie erreichen. Damit sind gleichzeitig die Grenzen der Reproduzierbarkeit von aus Modellrechnungen erhaltenen Werten aufgezeigt.

Mathematisch-hydrologische Modelle simulieren mit Hilfe eines Satzes mathematischer Gleichungen hydrologische Prozesse. Die Modelle werden mit Daten gespeist und nach sukzessiver Lösung der Gleichungen die Ergebnisse in digitaler Form ausgegeben (CHOW, VEN TE, 1964). Es werden stochastische und deterministische Modelle unterschieden.

Stochastische Modelle stellen mit den Mitteln der Statistik die Zusammenhänge zwischen Variablen dar, ohne die dazugehörigen Gesetzmäßigkeiten zu berücksichtigen.

Deterministische Modelle stellen die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung unter Ausschaltung der Zufallseinflüsse dar, d. h. sie berücksichtigen die einzelnen systematischen Vorgänge entsprechend ihrer Gesetzmäßigkeiten.

*) Die Untersuchungen wurden finanziell vom Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Schleswig-Holstein unterstützt.

Die deterministischen Modelle untergliedern sich ihrerseits in die „black box systems“ und die „distributed systems“. Das bekannte „black box model“ ist der Unit Hydrograph von SHERMAN (1932), bei dem von einer Linearität zwischen Niederschlag und Abfluß ausgegangen wird. Wesentlich komplizierter sind die „distributed models“, in denen detaillierte Einzelsysteme miteinander verknüpft sind. Ein sehr bekanntes „distributed model“ ist das Stanford Watershed Modell IV (CRAWFORD & LINSLEY, 1966).

In der vorliegenden Untersuchung wurde das USDAHL-74 Revised Model of Watershed Hydrology benutzt, ein „distributed model“, welches HOLTAN und seine Mitarbeiter im Agricultural Research Center in Beltsville, Maryland/USA, entwickelten (HOLTAN et al., 1974).

Nachfolgend wird der Aufbau des Modells kurz beschrieben, sowie seine Anwendung auf fünf Niederschlagsgebiete in Schleswig-Holstein.

2. Aufbau des USDAHL-Modells

Der grundsätzliche Aufbau des Modells ist schematisch in Abb. 1 dargestellt. Es wird davon ausgegangen, daß sich jedes Einzugsgebiet in sogenannte Hydrologische Zonen aufteilen läßt, welche die hydrologischen Reaktionen eines Bodenkörpers widerspiegeln. Die Hydrologischen Zonen haben die Dimension Länge \times Breite \times Tiefe. Je nach der Vielfältigkeit der hydrologischen Reaktionen innerhalb eines Gebietes können im Modell ein bis vier Hydrologische Zonen berücksichtigt werden.

Die auf das Gebiet fallenden Niederschläge verursachen einen Oberflächenabfluß, der kaskadenartig von einer Hydrologischen Zone zur darunterliegenden dem Wasserlauf entgegenfließt. Das Niederschlagswasser füllt zuerst die Speicherräume des Bodens auf. Werden die Bodenspeicherkapazität und die Infiltrationskapazität überschritten, gelangt das Niederschlagswasser oberflächlich zum Abfluß.

Die in den Bodenvertiefungen und Bodenrissen gespeicherten Wassermengen ermöglichen bis zur eigenen Erschöpfung, nach Beendigung des Niederschlages und des Oberflächenabflusses, eine weitere Auffüllung bis zur Infiltrationskapazität.

Dieser eben beschriebene Weg wird in jeder der vorhandenen Hydrologischen Zonen verfolgt (vgl. Abb. 1).

Betrachtet wird der Boden bis zu einer mittleren Durchlüftungstiefe. Der Bodenkörper untergliedert sich seinerseits in den durchwurzelten und undurchwurzelten Raum. Beide Räume können maximal soviel Wasser speichern, wie durch die Evapotranspiration verbraucht werden kann. Überschreitet die Bodenfeuchte im „Oberboden“ die Graviationskapazität, so versickert das von oben infiltrierte Wasser entweder weiter nach unten in den tieferliegenden „Unterboden“, oder es bewegt sich lateral entsprechend dem Potentialgefälle dem Wasserlauf zu.

Ähnlich verhält sich auch das in den „Unterboden“ perkolierte Wasser, das entweder in das Grundwasser gelangt oder aber sich lateral entsprechend dem Potentialgradienten in Richtung Gerinnebett bewegt und dort als Abfluß wirksam wird.

Die aktuelle Evapotranspiration wird aus den Kardinaltemperaturen der Transpiration der Pflanzen und den gemessenen Lufttemperaturen in Abhängigkeit von der potentiellen Evaporation und der pflanzenverfügbaren Wassermenge im durchwurzelten Bodenraum berechnet.

Die aktuelle Evaporation von der freien Wasser- und Bodenoberfläche errechnet sich aus Bodenkenndaten und der potentiellen Evaporation.

Das USDAHL-Modell besteht aus folgenden Unterprogrammen:

1. Niederschlag,
2. Hydrologische Zonen,
3. Böden,
4. Abflußregime,
5. Oberflächenabfluß und
6. Bodennutzung.

Die Dateneingabe umfaßt Parameter zur Charakterisierung der sechs Unterprogramme, außerdem schließt es die Dateneingabe der wöchentlichen Durchschnittstemperaturen, den prozentualen Rückgang der Evapotranspiration aufgrund von Beweidung oder Mahd, oberirdischer Pflanzenteile, die Bodenbearbeitung, die Bestellungsmaßnahmen, die Bodennutzung und die durchschnittliche wöchentliche potentielle Evaporation ein.

Mit dem USDAHL-Modell können die täglichen Abflüsse, der Gesamtabfluß, die mittlere tägliche Abflußspende, die Evaporation, die Evapotranspiration, die Grundwasserneubildung sowie die Bodenfeuchte berechnet werden.

3. Beschreibung der Untersuchungsgebiete

Schleswig-Holstein hat eine Gesamtfläche von 15700 km² und bildet mit Dänemark die Landbrücke von Mitteleuropa nach Skandinavien und trennt Nord- und Ostsee. Das Land gliedert sich von Ost nach West in drei Naturräume: Das Östliche Hügelland, die Geest im Mittelteil und die Marsch an der Westküste (Abb. 2).

Die Lage der fünf untersuchten Niederschlagsgebiete in Schleswig-Holstein ist in Abb. 2 dargestellt. Die Auswahl der Untersuchungsgebiete basiert auf der naturräumlichen Zonierung des Landes sowie der Verteilung der Niederschläge. Die ausgewählten Gebiete wurden lange, lückenlos hydrologisch beobachtet.

Als Wasserliefergebiete für die Wasserversorgung scheiden in Küstennähe die Marschen wegen ihrer brackischen Eigenschaften aus. Entsprechend der Flächengröße und der Niederschlagsmenge bieten die Geest und das Östliche Hügelland die größten Möglichkeiten für eine Wasserentnahme. Somit wurden Niederschlagsgebiete ausgewählt, die das Östliche Hügelland und die Geest repräsentieren.

Die fünf untersuchten Gebiete werden im folgenden kurz beschrieben.

Das erste Niederschlagsgebiet — Lecker Au — repräsentiert mit 143,30 km² des nördlichsten Teil des Landes, den Naturraum „Nördliche Geest“. Das Gebiet ist charakterisiert durch ausgeglichene morphologische Formen ausgedehnter Sanderablagerungen, die überwiegend als Grünland genutzt werden.

Das zweite untersuchte Gebiet, das 480 km² große Niederschlagsgebiet der Treene, repräsentiert den nördlichen und mittleren Teil der Geest mit den anmoorigen Niederungen. Hier dominiert ebenfalls das Grünland.

In dem dritten Niederschlagsgebiet — Honigau — mit einer Größe von 13,40 km² werden seit 1972 die Einflüsse verschiedener Verursacher auf die Wasserqualität des Hauptvorfluters Honigau untersucht.

Das vierte Niederschlagsgebiet — Trave bis Pegel Bad Segeberg — ist mit einer Größe von rund 330 km² typisch für den mittleren Teil des Östlichen Hügellandes mit Seen, Wäldern und ausgedehnten Ackerflächen.

Das fünfte Niederschlagsgebiet — Bille — mit einer Größe von rund 222 km² ist für die Wasserversorgung der Stadt Hamburg von Bedeutung. Etwa die Hälfte dieses waldreichen Gebietes besteht aus lehmigen Endmoränen, der Rest aus Absatzmoränen und Sandern.

4. Ergebnisse

Aus wasserwirtschaftlicher Sicht interessiert die Grundwasserneubildung hauptsächlich wegen der Nutzungsmöglichkeiten der Grundwasservorräte. Denn langfristig kann nicht mehr Grundwasser verbraucht werden, als im Mittel der Jahre neugebildet wird. Als Grundwasserneubildung wird hier die natürliche Auffüllung des Grundwassers bezeichnet, deren Größe in Millimeter angegeben wird. Für die Gebiete, in denen gegenwärtig und zukünftig Grundwasser gefördert wird, nämlich Östliches Hügelland und Geest, gibt Tab. 1 die aufgrund der vorliegenden Untersuchung ermittelten Schwankungsbereiche der Wasserhaushaltskomponenten an. Es zeigt sich eine Zunahme der Niederschläge vom Untersuchungsgebiet Lecker Au zur Treene und von dort eine Abnahme der Niederschläge bis hin zur Bille. Die berechnete Gebietsverdunstung ergab im Nordwesten des Landes 399 bis 488 mm/a, im Mittelteil 326 bis 425 mm/a und im Südosten 380 bis 483 mm/a. Das entspricht den Ergebnissen von BAUMANN, SCHEKORR und SCHENDEL (1970), wonach die aktuelle Gebietsverdunstung von Südosten nach Nordwesten ansteigt. Die berechneten Abflüsse wechseln entsprechend den natürlichen Verhältnissen. Die größten Abflußschwankungen zusammen mit den höchsten Abflüssen treten im Lecker Au- und Treene-Gebiet auf, die kleinsten Abflüsse im Bille-Gebiet. Die berechneten Grundwasserneubildungsmengen schwanken z. T. in einem sehr weiten Bereich. So werden im nördlichen Gebiet Lecker Au nur zwischen 1,5 und 3,0 mm/a, im Honigau-Gebiet 81 bis 126 mm/a neugebildet. Vergleichsweise ausgeglichen ist die Grundwasserneubildung im südlichsten, waldreichen Gebiet der Bille mit 24 bis 74 mm/a.

Die Güte der Modellrechnungen wurde an gemessenen Referenzwerten überprüft. Dabei wurde in allen Fällen eine sehr gute Übereinstimmung der Berechnung mit der Wirklichkeit erzielt (PREUSS, 1976).

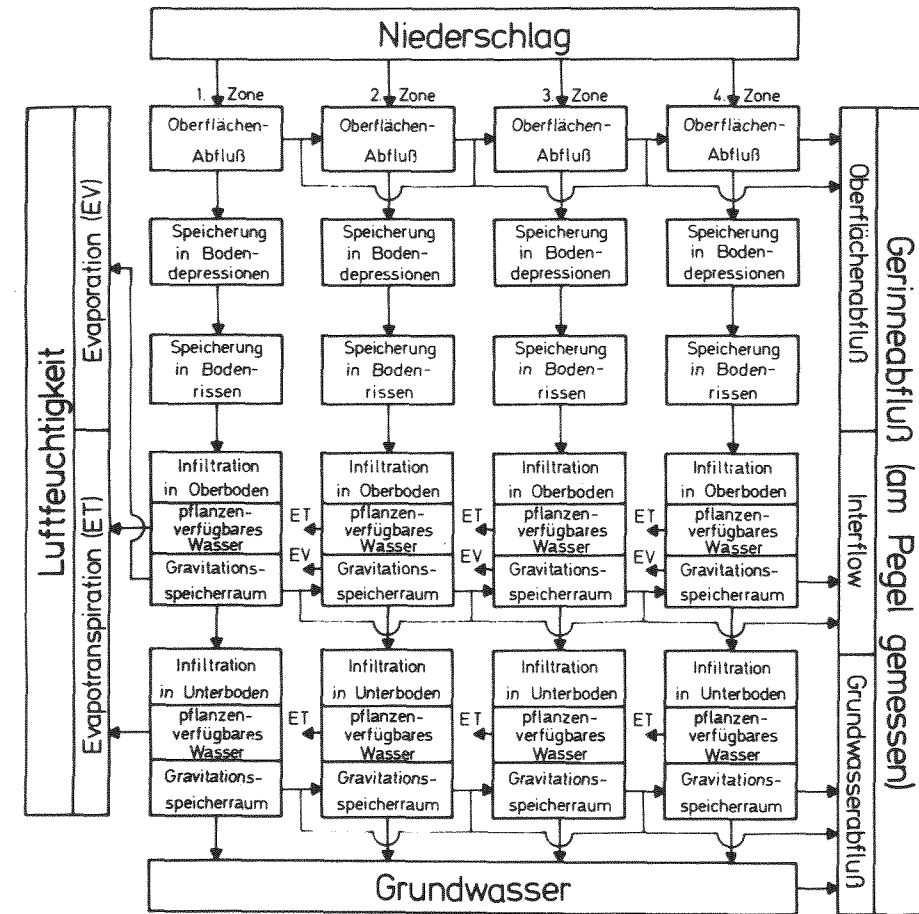


Abb. 1: Schematischer Aufbau des USDAHL-Modells

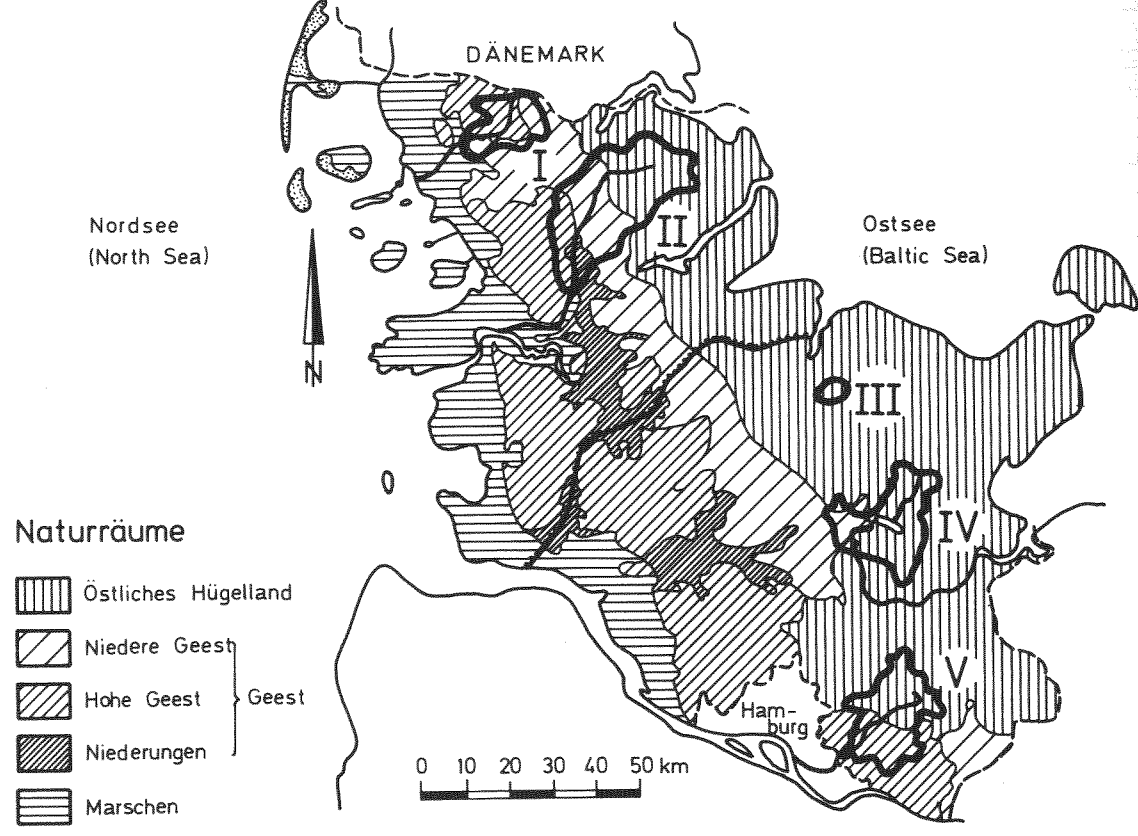


Abb. 2: Naturräume mit Lage der Untersuchungsgebiete (I bis V)

Tab. 1 - Untere und obere Simulationswerte der Wasserhaushaltskomponente von fünf Niederschlagsgebieten in Schleswig-Holstein (1964-1973)

Gebiet	Gebietsniederschlag mm	Gebietsverdunstung mm	Abfluß mm	Grundwasserneubildung mm
Lecker Au	653-1130	399-488	233-697	1,5-3,0
Treene	699-1071	326-425	272-656	30-87
Honigau *)	589- 775	393-435	92-155	81-126
Trave	468- 969	347-480	105-550	8-61
Bille	511- 816	380-483	118-297	24-74

*) Untersuchungsperiode 1971/74

Tab. 2 - Wasserbilanzen des Östlichen Hügellandes und der Geest (berechnet mit dem USDAHL-Modell)

Wasserhaushaltskomponente	nördl. Teil	Östl. Hügelland		nördl. Teil	Geest		Mittel Summe
		nördl. Teil	südl. Teil		mittl. Teil	südl. Teil*)	
Fläche	1919,0	2716,0	2596,0	1891,0	2488,0	1532,0	5911,0
Niederschlag	905,0	755,0	667,0	873,0	905,0	800,0	868,0
Verdunstung	394,0	414,0	437,0	445,0	385,0	470,0	426,0
Abfluß	459,0	308,0	186,0	428,0	463,0	220,0	389,0
Grundwasserneubildung	51,5	33,1	44,2	2,3	57,5	110,0	53,4
Niederschlag	1736,7	2050,6	1731,5	1654,6	2251,6	1225,6	5131,8
Verdunstung	756,1	1124,4	1134,5	841,5	957,9	720,0	2519,4
Abfluß	880,8	836,5	482,9	809,3	1150,7	337,0	2299,7
Grundwasserneubildung	98,8	89,9	114,7	4,3	143,1	168,5	315,9

*) geschätzt aus Angaben von

EINSELE & SCHULZ (1973), SCHEKORR (1971), SCHEKORR (1973), SCHEDEL & PREUSS (1973), SCHULZ (1972)

Tab. 3 - Grundwasserneubildung für Trockenjahre im östlichen Hügelland und der Geest

Naturraum	Teil	Fläche km ²	Grundwasserneubildung	
			mm	Mio m ³
östl. Hügelland	nördl.	1 919	28,8	43,7
	mittl.	2 716	8,0	21,8
	südl.	2 596	23,5	61,0
Geest	nördl.	1 891	1,5	2,8
	mittl.	2 488	30,3	75,3
	südl. *)	1 532	110,0	168,5
Mittel/Summe		13 142	28,4	373,1

*) geschätzt aus Angaben von

EINSELE & SCHULZ (1973), SCHEKORR (1971), SCHEDEL & PREUSS (1973), SCHULZ (1972)

In Tab. 2 sind die mittleren Wasserbilanzen des Östlichen Hügellandes und der Geest, wie sie sich aus der Untersuchung ergeben, zusammengestellt. Dabei handelt es sich um extrapolierte Werte, die aufgrund möglicher Unterschiede zwischen Repräsentativgebiet und Gesamtgebiet mit gewissen Vorbehalten zu beurteilen sind. Danach beträgt der mittlere Jahresniederschlag 763 mm, die mittlere jährliche Gebietsverdunstung 417 mm, der mittlere jährliche Abfluß 304 mm und die jährliche mittlere Grundwasserneubildung 42 mm im Östlichen Hügelland. Für die Geest ergibt sich ein mittlerer Niederschlag von 868 mm/a, wovon 426 mm/a verdunsten, 389 mm/a abfließen und 53,4 mm/a in das Grundwasser gelangen. Für beide Naturräume zusammen beträgt die mittlere jährliche Grundwasserneubildung 47 mm oder 619 Mio cbm/a.

Es muß jedoch betont werden, daß die genannte Menge von 619 Mio cbm/a als Richtwert für eine langfristige Grundwasserentnahme nicht maßgeblich sein kann. In Trockenjahren verringerte sich die Grundwasserneubildungsmenge entscheidend. Wie Tab. 3 zeigt, beträgt für Trockenjahre die Grundwasserneubildung in dem genannten Raum 375 Mio cbm/a oder nur rund 60 Prozent der durchschnittlichen Menge.

Da sich stark ausgeschöpfte Grundwasservorräte nur sehr langsam wieder auffüllen, sollte nicht die Menge der mittleren Grundwasserneubildung, sondern nur die der Trockenjahre zugrunde gelegt werden.

Die Größe der mit dem USDAHL-Modell berechneten Grundwasserneubildung weicht nicht wesentlich von den Werten von SPAHR (1971), SCHEDEL und PREUSS (1973) ab.

Das USDAHL-Modell hat sich als brauchbare Methode zur Bilanzierung von Gebietswasserhaushalten und zur Ermittlung der Grundwasserneubildung erwiesen.

5. Zusammenfassung

Das Ziel dieser Untersuchung war die Ermittlung der Grundwasserneubildung in den für die Grundwassernutzung in Frage kommenden schleswig-holsteinischen Naturräumen. Da eine direkte Messung der Grundwasserneubildung eines Gebietes nicht möglich ist, wurde diese mit Hilfe eines mathematisch-hydrologischen Modells berechnet. Das zur Berechnung verwendete USDAHL-Modell wurde von HOLTAN und Mitarbeitern in den USA entwickelt und hier modifiziert.

Dem USDAHL-Modell liegen folgende Überlegungen zugrunde:

1. Jedes Einzugsgebiet unterteilt sich in Hydrologische Zonen, die die hydrologischen Reaktionen innerhalb eines Bodenkörpers widerspiegeln.
2. Die Niederschläge verursachen einen Oberflächenabfluß, der kaskadenartig von einer hydrologischen Zone in die darunterliegende bis hin zum Wasserablauf fließt. Auf der Bodenoberfläche kann nur der Anteil des Wassers abfließen, der nach Auffüllung vorhandener Speicherräume übrigbleibt.
3. Im Oberboden kann soviel Wasser gespeichert werden, wie der Gravitationskapazität entspricht. Wird diese überschritten, perkoliert das infiltrierte Wasser in den Unterboden oder es bewegt sich sofort zum Wasserlauf. Ähnlich verhält sich das in den Unterboden versickerte Wasser.

4. Die aktuelle Evapotranspiration wird aus Kardinaltemperaturen der Transpiration der Pflanzen und den gemessenen Lufttemperaturen in Abhängigkeit von den potentiellen Evaporation und der pflanzenverfügbaren Wassermenge im durchwurzelten Bodenraum berechnet.
5. Die aktuelle Evaporation von der freien Wasser- und Bodenoberfläche wird aus Bodenkenndaten und der potentiellen Evaporation berechnet.
6. Der Abfluß wird aus Bodenkenndaten und Abflußrezessionskoeffizienten ermittelt.

Untersucht wurden mit dem USDAHL-Modell fünf Niederschlagsgebiete in Schleswig-Holstein und folgendes Gesamtergebnis erzielt:

Im Mittel fielen 810 mm Niederschlag im Jahr (10651 Mio cbm/a), davon verdunsteten 421 mm im Jahr (5534 Mio cbm/a), 342 mm flossen jährlich ab (4500 cbm/a) und 47 mm füllten jährlich das Grundwasser wieder auf (619 Mio cbm/a).

Schriften

- BAUMANN, H., SCHEKORR, E. & SCHENDEL, U. (1970): Gebietswasserhaushaltsbilanzen in kleinen Einzugsgebieten in Schleswig-Holstein. Z. Dtsch. Geol. Ges., Sonderh. Hydrogeol., Hydrogeoch., Hannover, 1970.
- CHOW, VEN TE (1964): Hand book of Applied Hydrology. McGraw Hill, New York, San Francisco, Toronto, London
- CRAWFORD, N. H., LINSLEY, R. K. (1966): Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV — Stanford University Dept. of Civil Eng. Technical Report No. 39.
- EINSELE, G. & SCHULZ, H. D. (1973): Über den Grundwasserhaushalt im Norddeutschen Flachland. Teil I. Grundwasserneubildung bewaldeter und waldfreier Sanderflächen Schleswig-Holsteins. Besondere Mitt. Z. Dtsch. Gewässerkd. Jb. Nr. 36. Landesamt f. Wasserhaushalt u. Küsten Schleswig-Holstein, Kiel.
- HOLTAN, H. N., STILNER, G. J., HENSON, W. H. & LOPEZ, N. C. (1974): USDAHL-74 Revised Model of Watershed Hydrology. A United States Contribution to the International Hydrological Decade. Plant Physiology Institute Report No. 4, 1974. Agricultural Research Service United States Department of Agriculture.
- PREUSS, E. (1976): Ermittlung der Grundwasserneubildung in schleswig-holsteinischen Naturräumen mit Hilfe des USDAHL-Modells. Dissertation, Kiel.
- SCHEKORR, E. (1971): Untersuchungen über den Wasserhaushalt von drei Niederschlagsgebieten in Schleswig-Holstein unter besonderer Berücksichtigung der Gebietsverdunstung. Dissertation, Kiel.
- SCHENDEL, U. & PREUSS, E. (1973): Die Wasserspende schleswig-holsteinischer Naturräume. — Bauernblatt/Landpost Für Schleswig-Holstein, 123., 18. Ausg.—27., 1574—1576, Rendsburg, 5. 5.
- SHERMAN, L. K. (1932): Streamflow from Rainfall by the Unitgraph Method. Eng. News Record Vol. 108.