Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss foresty journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 122 (1971)

Heft: 10

Artikel: Der Einfluss des Waldes auf den Kreislauf des Wassers

Autor: Keller, H.M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-767298

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Der Einfluss des Waldes auf den Kreislauf des Wassers

Von *H. M. Keller,* Birmensdorf Oxf. 181.312

(Aus der Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf ZH)

1. Was steht zur Diskussion?

Ob es um Erosions- und Hochwasserschutz, Hangsicherung, Wasserversorgung in Menge und Qualität, Gewässerschutz oder andere «Wasserprobleme» geht, der Wald spielt eine wichtige Rolle. Auf welche Weise die Einflüsse des Waldes wirken, wurde weltweit am internationalen forsthydrologischen Symposium in Moskau 1970 behandelt; die folgenden Ausführungen geben die Hauptergebnisse dieses Treffens wieder. Erosions- und Hochwasserschutz, Bodenwasserhaushalt und Wasserertrag, Wasserqualität, Niederschlag und Verdunstung im Wald, die Bewirtschaftung von Nassstandorten sowie die Bedeutung für die forstliche Praxis sind heute die brennendsten Wasserprobleme um den Wald.

2. Der Schutz gegen Erosion und Hochwasser

Die Bekämpfung von Erosion ist vor allem dort wichtig, wo Land urbar gemacht oder von einer Nutzungsart in eine andere übergeführt wird. In Gebirgsgegenden bekommt das Wasser durch die Schwerkraft zusätzliche Gewalt. Es gibt unzählige Beispiele von Hochwasserschäden und Bodenerosion, die — direkt oder indirekt — auf Waldzerstörung zurückzuführen sind. Solange der Wald intakt ist, erfüllt er weitgehend seine Funktion als Erosionsschutz, nicht nur durch seinen mechanischen Schutz und die Verfestigung der Bodenoberfläche, sondern auch als aktiver Transpirator, der den Boden vor gefährlicher Durchnässung schützt. Bei Ereignissen allerdings, die säkularen Charakter haben, ist auch der Wald seiner Aufgabe als Erosionsschutz nicht mehr gewachsen. Dann sind für das Auftreten extremer Hochwasser- und Erosionsschäden, vor allem meteorologische und geologisch-topographische Bedingungen massgebend.

Khanbekov, Namba, Keller und Skorodumov beleuchten die Probleme des Erosions- und Hochwasserschutzes in den Gebirgen Russlands und Japans, in den Alpen und den Steppen Südrusslands. Meistens handelt es sich um Wiederherstellungsarbeiten, nachdem der Mensch durch sein Eingreifen zur Landnutzung das natürliche Gleichgewicht im Wasserkreislauf gestört hat. Nur selten gelingt es, den Waldbestand durch einfache Aufforstung wiederherzustellen. Oft ist viel Bodenmaterial verlo-

rengegangen, die erodierten Berghänge sind instabil geworden, zusätzliche mechanische Massnahmen drängen sich auf, wie zum Beispiel Terrassierung, Bau von Flechtwerk, Stützmauern, Sperren usw. Sorgfältige Auslese des Pflanzmaterials, Bewässerung und Düngemittelzugabe sowie Einschränkung in der Bewirtschaftung (Beweidung) tragen ebenfalls dazu bei, gute Anwuchserfolge zu erzielen. Die Praxis der Aufforstungen und der baulichen Vorkehrungen gegen Erosion und Hochwasser (Wildbachverbau) basiert in allen Teilen der Welt fast ausschliesslich auf mehr oder weniger langfristiger Erfahrung. Es ist ein alter Wunsch, weltumfassend oder zumindest regional gültige Regeln für vorbeugende Massnahmen gegen Erosion und Hochwasser aufzustellen. Bis heute sind aber nur lokal anwendbare Richtlinien zusammengestellt worden. In den Ländern mit langjähriger Erfahrung sind erfolgreiche Verbauungen und Aufforstungen an der Tagesordnung. Dort scheint es nicht mehr notwendig, eigentliche Forschung auf diesem Gebiet zu betreiben; die Untersuchungen beschränken sich auf einige bodenmechanische und hydraulische Teilprobleme sowie auf den Sedimenttransport und die Aufforstungstechnik. Eine systematische Erforschung des Erosionsphänomens von der hydrologischen Seite her ist jedoch bisher nicht umfassend an die Hand genommen worden. Den Ländern mit wenig Erfahrung, die auch meistens die grössten Probleme haben, stehen also nur eine Vielzahl von Beispielen erfolgreicher und misslungener Verbauungen zur Verfügung. Systematische Forschungsergebnisse fehlen, so dass vorläufig die eigene Erfahrung und die Verhütung anderswo gemachter Fehler die einzige realistische Lösung des Problems darstellen. Folgende Kriterien, die für erfolgreichen Erosionsschutz und Wildbachverbau unerlässlich sind, werden allgemein anerkannt:

Bauliche Massnahmen zur Stabilisierung von Gerinne und Hang in Verbindung mit der Wiederherstellung der Waldvegetation, Bodenverbesserungen und Verwendung von ausgelesenem Pflanzmaterial sowie eventuelle Einschränkung der Bewirtschaftung (Beweidung).

Ökonomische Gesichtspunkte entscheiden heute oft über Erfolg und Misserfolg. Es gilt daher, Prioritäten und Schwerpunkte zu bilden, um mit den vorhandenen Mitteln optimalen Erfolg zu haben. Erfahrungsaustausch und sorgfältige Planung helfen, unnötige Kosten zu vermeiden.

3. Der Wald steuert den Wasserertrag

Wald und Wasserertrag ist lange Zeit ein umstrittenes Thema gewesen. Zahlreiche Beobachtungen aus der ganzen Welt haben lange kein Licht in dieses Problem gebracht. Es wurde nur beobachtet, nicht experimentiert. Erst in den letzten 30 Jahren sind, vor allem in den USA, Versuche in Einzugsgebieten durchgeführt worden. Diese beweisen, dass der Wald im Verlauf eines Jahres mehr Wasser «verbraucht» als jede andere Vegetationsdecke (Hewlett). Leider kann mit Versuchsflächen allein derselbe

Beweis nicht erbracht werden, weil es sich beim Wasserertrag um eine Wassermenge handelt, welche in Quellen und Oberflächen- sowie Grundwassern verfügbar wird, das heisst um die Resultierende der Wasserbilanz eines hydrologisch begrenzten Gebietes. Es ist daher unerlässlich, Untersuchungen in Einzugsgebieten für die Beweisführung heranzuziehen, da uns heute die Kenntnisse fehlen, um von Versuchsflächenuntersuchungen auf ganze Gebiete zu extrapolieren. Versuchsflächen dienen in diesem Zusammenhang dazu, die im ganzen Einzugsgebiet gemachten Beobachtungen zu erklären und Ursächlichkeiten zu erforschen. Sie sind wegen ihrer Kontrollierbarkeit notwendig und unersetzlich. Untersuchungen in Einzugsgebieten werden auch dazu verwendet, Bodennutzungseffekte auf das Abflussregime zu testen. Eine besonders wichtige Rolle spielt der unmittelbare Abfluss bei Regen (Oberflächenabfluss). Subbotin ist der Frage des Einflusses des relativen Waldanteils in Einzugsgebieten nachgegangen. Der oberflächennahe Abfluss ist in Waldgebieten durchwegs kleiner als im offenen Feld. Dies ist vor allem auf die meist besseren Infiltrationsbedingungen im Waldboden, aber auch auf die grösseren Verdunstungsverluste im Wald zurückzuführen. In den genügend mit Wasser versorgten nördlichen Waldgebieten des europäischen Russlands ist dieser Unterschied zwischen Feld und Wald weniger augenfällig als in den südlicheren Gebieten.

Im Winter ist der Boden im offenen Gelände tiefer gefroren als im Wald. Ist viel Schnee vorhanden, kann während der Schmelze im Wald mehr Wasser in den Boden einsickern als im Feld, der oberflächennahe Abfluss wird kleiner. Ein weiterer wichtiger Faktor ist der Grundwasserspiegel. Ist er nahe der Bodenoberfläche, genügt ein kleiner Regen, um Oberflächenabfluss zu erzeugen. Wird der Wasserspiegel in Waldgebieten durch die Transpirationstätigkeit des Waldbestandes gesenkt, kann wieder mehr Wasser in den Boden einsickern, der Oberflächenabfluss nimmt ab. Wird der Wald in solchen Gebieten kahlgeschlagen, kann es zu unerwünschtem Ansteigen des Wasserspiegels führen.

Die in verschiedenen Regionen von Russland durchgeführten Vergleiche haben durchwegs eine Abnahme des Abflusses (in Prozenten des Niederschlages) mit zunehmendem Waldanteil im Einzugsgebiet gezeigt. Die Abnahme ist gering und beträgt zwei bis fünf Prozent für eine Zunahme des Waldanteils von zehn Prozent. Für den Oberflächenabfluss sind also bemerkenswerte, aber nicht drastische Unterschiede zwischen Wald und Feld zu erwarten.

Die Regulierbarkeit des Wasserertrages durch Massnahmen in der Vegetationsdecke bekommt in wasserarmen Gebieten eine besondere Bedeutung. Die Bewirtschaftung nach Wasserertrag bedeutet Regulierung der Evapotranspirationsverluste (Lull), da Versuche zur Regenvermehrung und damit zur Erhöhung des Wasserertrages bis heute wenig positiv verlaufen sind. Eine extreme Massnahme ist der Kahlschlag von Wald, der in

verschiedenen Gebieten der USA 150 bis 400 mm mehr Jahresabfluss bewirkt hat (1 mm = 1 l · m^{-1}). Dieses Vorgehen missachtet aber die Pflege der Wasserqualität. Obwohl mehr Wasser verfügbar wird, ist ein Grossteil davon durch Oberflächenerosion verschmutzt. Es drängt sich eine gemässigte Art der Wasserertragserhöhung auf. Sie kann auch durch weniger starkes Eingreifen in den Bestand erreicht werden, die Erhöhung des Wasserertrages fällt jedoch kleiner aus. In jedem Fall aber geht die Erhöhung des Abflusses auf Kosten der Holzproduktion. Schliesslich geht es um die Optimierung sowohl des Holz- als auch des Wasserertrages. Dazu kommt ein weiterer wirtschaftlicher Faktor: Dieses «gewonnene» Wasser muss billiger sein als durch rein technische Massnahmen aufbereitetes Wasser.

In den Problemkreis des Wasserertrages stellt Rakhmanov seine Untersuchungen über den Einfluss des Waldes auf den Jahresabfluss in über 50 Einzugsgebieten der oberen Wolga. Die Grösse der Einzugsgebiete variiert von 20 bis 2000 km^2, alle sehr flach oder leicht hügelig. Unter Verwendung der Einfach- und Mehrfachregression kommt Rakhmanov zum Schluss, dass einer Bewaldungszunahme von 10 Prozent der Einzugsgebietsfläche im Mittel einer Abflusszunahme pro Jahr von 15 mm entspricht. Dieses Ergebnis wird vom Zahlenmaterial her nicht angezweifelt, es könnte jedoch zu dem Schlusse führen, dass der Wald die Zunahme des Abflusses bewirkt. Die Regressionstechnik gibt aber nicht über Ursache und Wirkung Aufschluss. Es ist deshalb zu vermuten, dass gewisse klimatische Faktoren sowohl die Abfluss-, als auch die Waldverhältnisse natürlicherweise beeinflussen. Da das Klima aber nur summarisch in der Mehrfachregressionstechnik berücksichtigt wurde, erschien die direkte Beziehung zum Waldanteil enger. Es könnte sich dahinter sehr wohl ein klimatischer Kausalzusammenhang verbergen.

4. Der Wald begünstigt die Wasserqualität

Die Frage der Beeinflussung von Wassermenge und Wasserqualität durch Bewirtschaftungsmassnahmen wird von Popedinsky, Tarrant, Nikolaenko und Rothacher behandelt. Sie alle stimmen mit Lull überein, dass durch Bestandspflege der Wasserertrag wohl beeinflusst werden kann, dass dies aber in vielen Fällen auf Kosten der Wasserqualität geht. Vor allem Kahlschläge ohne sofortige Wiederaufforstung und unsorgfältige Holzhauerei haben oft Erosionsschäden und Bodenabtrag zur Folge. Auch der Wegebau hat schon manches Gewässer stark in Mitleidenschaft gezogen. In Schutzwaldungen sollte daher nie kahl geschlagen werden und auch nur mit grösster Vorsicht Holz geerntet werden. Die Verwendung von Seilkrananlagen wird aus Gründen des Erosionsschutzes empfohlen. Helikopter- und Ballonsysteme werden heute noch wenig gebraucht.

Es sind nicht nur Schwebestoffe, welche die Wasserqualität beeinträchti-

gen, ebenso, oder noch wichtiger ist der Einfluss der Bewirtschaftung auf die gelösten Stoffe, auf die Wassertemperatur, die mikrobiologische Beschaffenheit und die Verschmutzung durch Chemikalien. Im Sommer sind schon Temperaturerhöhungen bis zu 8 °C im Monatsmittel durch Freilegen von Waldgewässern (Kahlschlag) hervorgerufen worden. Erhöhte Wassertemperaturen wirken sich ungünstig auf Fauna und Mikrobiologie im Wasser aus. Bakterienkonzentrationen werden besonders bei grossem Anteil an oberflächlich abfliessendem Wasser beobachtet. Die Quellen der mikrobiologischen, organischen Verschmutzung sind vor allem Abwässer, Beweidung, Campieren, Abfälle entlang der Strassen und Wege usw. Sie müssen streng unter Kontrolle gebracht werden, um eine gute Qualität der Gewässer zu erhalten. Die gelösten Stoffe im Wasser sind natürlicherweise abhängig vom Bodentyp, vom Muttergestein, von der Vegetationsdecke, von der Wasserführung und von der Bewirtschaftung. Es wurde nachgewiesen, dass durch Kahlschlag die Stickstoffkonzentration im Wasser 4 bis 5fach erhöht werden kann. Dabei wird der Stickstoffhaushalt gestört; die Mikroorganismen im Boden produzieren wohl weiter Nitrat, die Aufnahme in die Pflanzen wird aber durch das Entfernen des Bestandes unterbunden. Der Störung des Stoffhaushaltes durch die Bewirtschaftung muss in Zukunft vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt werden. Auch durch Überdüngung und Pestizide werden die Wasser unnötig mit Chemikalien belastet. Solche Wasser für die Wasserversorgung aufzubereiten bringt schwierige technologische Probleme mit sich. Der Waldboden wirkt im allgemeinen als effektvoller chemischer Filter, solange der Boden-Pflanzen-Kreislauf nicht gestört ist. Dem Chemismus des Meteorwassers und seiner Veränderung im Kronendach, dem Stammablauf, der Infiltration und Perkolation im Boden wird deshalb in vielen Ländern viel Aufmerksamkeit geschenkt (Gubareva).

5. Der Niederschlag im Wald

Leyton, Molchanov, Anderson, Rakhmanov und Federov behandeln feste und flüssige Niederschläge, deren Messung, Zurückhaltung im Baumbestand sowie den Einfluss des Waldes auf die Bildung von Niederschlag. Es gilt für viele verschiedene Waldtypen in Ost und West, dass Struktur und Typ des Waldes den Wasserkreislauf beeinflussen. Die Nachlieferung von Niederschlagswasser in den Untergrund hängt von der Art der Waldbehandlung ab. Im Winter bleibt der Schnee im Wald und im Wind- und Strahlungsschatten von Waldrändern lange liegen. Im Frühjahr verzögert sich die Schmelze und damit der Wasserabfluss gegenüber offenem Gelände. Durch entsprechende Waldbehandlung kann die Niederschlagsdurchdringung und damit auch der Wasserertrag vergrössert werden. Wo Wassermangel herrscht, ist dies von grosser Bedeutung.

Die Messung der Niederschläge ist ein weltweites Problem. Sowjetische Untersuchungen geben sehr genaue, aber nur selten mit statistischen Para-

metern ausgerüstete Niederschlagswerte an. Andernorts hält man es für unmöglich, die wahre Grösse des Niederschlages zu bestimmen, jede Messung sei mit mehr oder weniger grossen Fehlern behaftet. Es fällt deshalb schwer, hydrologisch schwach wirksame Einflüsse festzustellen, wenn die Ausgangsgrösse, der Niederschlag, nicht genügend genau gemessen werden kann. Darin liegt wohl auch ein Teil der gegensätzlichen Auffassungen über den Einfluss des Waldes auf Niederschlag und Abfluss begründet: Untersuchungen in West- und Zentraleuropa, Nordamerika und Südafrika haben gezeigt, dass der Wasserertrag in mittelgrossen und kleinen Einzugsgebieten abnimmt, wenn unter sonst vergleichbaren Bedingungen der Waldanteil zunimmt. Dies wird auf den allgemein grösseren Wasserverbrauch des Waldes gegenüber landwirtschaftlich genutzten Flächen zurückgeführt. Im Gegensatz dazu steht die von Rakhmanov vertretene Ansicht, dass die Abflussmenge mit zunehmendem Waldanteil ebenfalls zunimmt. Als Ursache kann die Zunahme der Niederschläge über grossen Waldkomplexen geltend gemacht werden. Es ist jedoch abzuklären, ob dies eine echte Zunahme ist oder ob sie messtechnisch bedingt ist. Wenn nämlich der Niederschlag über dem Wald in relativ kleinen Lichtungen gemessen wird, ist die Niederschlagszunahme nicht auf den Einfluss des Waldes, sondern auf die Aufstellung des Messinstrumentes zurückzuführen.

Es werden also berechtigte Zweifel erhoben an der Behauptung, dass der Wald Ursache des grösseren Abflusses sei. Die Hypothese Rakhmanovs basiert auf Beobachtungen in verschieden grossen Einzugsgebieten, ohne dass darauf ausgerichtete Experimente durchgeführt wurden. Der grössere Wasserverbrauch des Waldes im Vergleich zu andern Vegetationsdecken lässt sich aber an zahlreichen Experimenten in West und sogar Ost (zum Beispiel Signa Gnilka, UdSSR) nachweisen.

6. Der Wald verbraucht Wasser

In diesem Themenkreis gab Baumgartner eine Zusammenfassung der Verdunstungsvorgänge im Wald. Bei der Verdunstung wie bei der Transpiration geht es um den Wasserdampftransport vom Bestand in die Atmosphäre. Dieser Vorgang kann als Thermodynamischer Prozess verstanden und auch untersucht werden. Auch eine Kombination der Betrachtungsweise von Energie- und Wasserbilanz wird erfolgreich verwendet. Thermodynamisch spielt die Rauhigkeit des Kronendaches für den Wasserdampftransport eine ausschlaggebende Rolle; er ist nach Baumgartner bis 300mal rauher als eine Wiesenoberfläche. Für den Energieaustausch ist die Waldoberfläche mit meist dunkler Farbe und deshalb relativ höheren Oberflächentemperaturen wichtig. Die aus der Absorption von Strahlung zur Verfügung stehende Energie ist gross und wird zu einem grossen Teil für Verdunstung wieder verbraucht. Wegen der grossen Oberflächenrauhigkeit und des Absorptionsvermögens kann vom Wald mehr Wasserdampf in die Atmosphäre

abgegeben werden als von einer andern Vegetationsart. Vorausgesetzt, dass genügend Wasser vorhanden ist, wird ein Wald mit zunehmender Biomasse auch mehr verbrauchen. Dieser Trend ist durch energetische und thermodynamische Untersuchungen sowie Lysimeterversuche bestätigt worden.

Voronkov und Bochkov geben Auskunft über ihre Versuchsflächen- und Kleineinzugsgebiets-Untersuchungen in verschiedenen Waldtypen. Interception und Sickerung sind von der Struktur, der Baumartenzusammensetzung und vom Bodentyp abhängig. Die als Restglied in der Wasserbilanz errechneten Verdunstungswerte von Feld und Wald variieren von Ort zu Ort und von Jahr zu Jahr. Der Wasserertrag aber ist in offenem Gelände meist etwas grösser als in Waldgebieten. Wie schon öfters gezeigt, werden im Wald weniger extrem hohe Abflussspitzen beobachtet als in offenen Gebieten. Während der Schneeschmelze beträgt in Waldgebieten Russlands die Verzögerung des Spitzenabflusses vier bis zehn Tage. Wichtig ist auch der Hinweis auf die Rolle der Waldränder oder Waldstreifen, die eine oft willkommene Feuchtekonservierung im Wind- und Strahlungsschatten bewirken.

7. Die Rolle des Waldbodens im Wasserkreislauf

Die Literatur, die sich mit dem Wasserhaushalt von Waldböden befasst, ist sehr umfangreich. Kaum zwei Böden verhalten sich ähnlich, da nicht nur bodenphysikalische Grössen, sondern auch die Vegetationsdecke und das Klima den Wasserhaushalt bestimmen. Rode, Zinke und Shumakov haben sich in ihren Referaten auf einige Vorgänge der Wasserbewegung im Boden beschränkt. In der Sowjetunion ist das Wasserregime von humiden Steppen- und Permafrost-Böden Grundlage für den Wasserhaushalt des Waldes (Rode). Die humiden russischen Waldgebiete stehen unsern voralpinen Verhältnissen in der Schweiz nahe. Die Steppenböden jedoch zeichnen sich durch ihren «toten Trockenhorizont» aus. Dieser permanent trockene Horizont befindet sich meist in zwei bis fünf Meter Tiefe. Es gibt keine Grundwassernachspeisung (Tiefensickerung), da die Niederschläge kleiner sind als die Evapotranspiration des Waldes. In landwirtschaftlich genutzten Flächen ist dieser «tote Trockenhorizont» weniger häufig anzutreffen, da die Evapotranspirationsverluste kleiner sind als im Wald. Bei den Permafrostböden spielt eine durch Frost hervorgerufene undurchlässige Schicht die Hauptrolle im Wasserhaushalt. Im Winter ist der ganze, relativ trockene Bodenblock gefroren, die Wasserbewegung ist minimal. Nur wenig Schnee fällt in jenen Regionen von Zentral- und Ostsibirien. Im Sommer taut der Boden zwei bis drei Meter tief auf, so dass die Schmelzwasser meist im auftauenden Boden versickern und Oberflächenabfluss selten ist. Bei starkem Sommerregen bildet sich ein Wasserspiegel oberhalb des Permafrosthorizontes, welcher im Laufe des trockenen Herbstes durch Evapotranspiration der Pflanzendecke wieder verschwindet.

Der Bodenwasserhaushalt ergibt sich aus dem ständigen Einwirken von Quellen und Senken (Zinke). Als Quellen gelten unter anderem Infiltration von Schmelzwasser, Meteorwasser und Bewässerung, die Sickerung in das Bodenprofil, allfällige Wasserstandsänderungen im Grundwasserspiegel und Thermodiffusion von Wasserdampf. Als Senken werden die Verdunstung, Transpiration, Sickerung aus dem Bodenprofil, Oberflächenabfluss und Thermodiffusion von Wasserdampf betrachtet. Der Waldboden-Wasserhaushalt ist sehr stark von der Zusammensetzung des Bestandes abhängig. Umgekehrt ist die Produktivität gebunden an das Wasserdargebot des Bodenprofiles. Der Bodendichte misst Shumakov die grösste Bedeutung unter allen bodenphysikalischen Parametern zu. Er versucht damit die Phänomene des Wasserregimes im Boden zu erklären. Die Bodendichte sei vor allem abhängig vom Muttergestein, der Bodenstruktur, dem Typ der Bodenbildung und von der Zusammensetzung des Waldbestandes. Überdies werde die Dichte der oberflächennahen Horizonte sehr stark von der Bodenbenutzung beeinflusst.

8. Die Bewirtschaftung von Sumpfwäldern (Nassstandorte)

Nur ein Teil der in Nordeuropa und Nordamerika weitverbreiteten Sumpfwälder wird heute bewirtschaftet. In Finnland, Schweden, Norwegen, Polen, der Sowjetunion und in den USA ist die Technik der Drainage von Sumpfwäldern auf empirischer Basis soweit fortgeschritten, dass die Produktivität dieser Nassstandorte verbessert werden konnte. Klawitter und Vompersky glauben, dass durch geeignete Massnahmen die Produktivität dieser Wälder noch weiter gesteigert werden kann. Allein im Südosten der USA gibt es über 14 Mio ha, in der Sowjetunion über 25 Mio ha Sumpfwälder, die durch Drainage melioriert werden sollen. Es handelt sich ausschliesslich um ebene oder nur sehr schwach geneigte Waldflächen. Wie soll entwässert werden, um optimale Verbesserungen zu erreichen? Die Fragen der Grabenabstände und der Grabentiefe, des beschleunigten Oberflächenabflusses bei Regen, Grabenerosion und Hochwasser sind alle gleichzeitig zu betrachten. Systematische Untersuchungen in der Sowjetunion gehen auf die biologische Wirkung der Wasserspiegelabsenkung ein. Da die Jahresniederschläge dort etwa 600 mm betragen, die Verdunstung aber nur 400 mm, ist bei ebenen fast undurchlässigen Böden eine Versumpfung natürlich. Die Frage der Wasserspiegelabsenkung und der Produktionssteigerung drängt sich wegen der riesigen Flächenausdehnung auf. Die besten Zuwachsgewinne bei Fichten und Föhren zeigen sich, wenn zu Beginn der Vegetationsperiode der Wurzelraum mit Sauerstoff gut versorgt ist. Die Durchlüftung der Bodenschicht unmittelbar oberhalb des Wasserspiegels ist für das Wurzelwachstum entscheidend. Da das stehende Wasser schlecht mit Sauerstoff versorgt ist, wirkt es wachstumshemmend. Die Drainagemassnahmen müssen sich also nach der Lage des Hauptwurzelraumes richten, der

wiederum vom Nährstoffangebot und der Durchlüftung im Boden abhängt. Er ist meist in 20 bis 30 cm Tiefe zu finden. Die Drainage muss also darauf ausgerichtet sein, dass bei Beginn der Vegetationsperiode der Wasserspiegel unterhalb des Hauptwurzelraumes zu liegen kommt. Ist der Wasserspiegel vor der Drainage in etwa 20 cm Tiefe, genügen etwa 1 m tiefe Gräben in 50 und mehr Meter Abstand, um das Oberflächenwasser in die Hauptgräben zu leiten. Es ist erstaunlich, wie durch diese extensiv erscheinende Massnahme Volumenzuwachsvermehrungen von 2 bis 6 m^3 pro ha und Jahr beobachtet wurden. Nur in Kahlschlagflächen, wo der Wasserspiegel beinahe an der Oberfläche ist, sind 0,50 m tiefe Gräben in 10 bis 30 m Abstand notwendig.

Bei diesen Massnahmen zur Produktionssteigerung geht es vor allem um die Entwässerung des Humushorizontes; die fast undurchlässigen Mineralhorizonte sind kaum entwässerbar. Es sind der höchste Stand des Wasserspiegels unter der Bodenoberfläche und die Häufigkeit seines Vorhandenseins während der Vegetationsperiode, nicht aber die maximale Tiefe, die den Erfolg einer Entwässerung bestimmen. Die Zuwachsvermehrung wird der Tatsache zugeschrieben, dass bei Sommerregen hohe Wasserstände, welche die Assimilation stark beeinträchtigen, weniger häufig auftreten. Auch die Konzentration der Nährstoffe im dichteren Boden (als Folge der Bodenabsenkung), das verbesserte Wasser- und Durchlüftungsregime und die Vergrösserung des Wurzelhorizontes sind als Faktoren zu beachten. Für die Föhren-Fichtenwälder der südlichen Taiga Russlands werden im allgemeinen 50 bis 60 cm mittlerer Grundwasserstand während der Vegetationsperiode angestrebt. Bei Sommerregen sollte der Wasserspiegel nicht höher als 20 bis 30 cm unter die Bodenoberfläche steigen. Diese Tiefen korrespondieren mit der maximalen Wurzeltiefe beziehungsweise mit der Lage des Hauptwurzelhorizontes im Boden.

9. Gegenwart und Zukunft der forstlichen Hydrologie

Die Wälder der Welt sind heute immer weniger nur für die Holzproduktion bestimmt. In einer wachsenden Weltbevölkerung bekommen das Wasser aus dem Wald, die Wohlfahrtswirkungen des Waldes, die Erholung des Menschen im Wald sowie der Wald als Lebensraum für die Tierwelt immer grössere Bedeutung.

Nach Dunford und Melekhov schalten sich die Erkenntnisse der forstlichen Hydrologie auf einer Stufe der Planung ein, wo es ganz prinzipiell um den Wald, um seine vielfältigen Funktionen, sein Produktionsvermögen und sein Beziehungsgefüge zur Umwelt geht. Den Wirkungen einer Einflussnahme durch den Menschen auf den Wald kommt besondere Bedeutung zu. Wie wirken sich gewisse Massnahmen unserer Bewirtschaftung aus, nicht nur im Sinne der Holzproduktion, sondern auch bezüglich des Erosionsschutzes, des Wasserertrages, des Umweltschutzes, der Erholungs-

aufgabe usw.? Die grossen Windschutzaufforstungen in Südrussland (800 000 ha) sowie in anderen Teilen der Welt zeugen von der Einbeziehung des Waldes in die Bodennutzungsplanung. Über 20 Prozent der russischen Wälder haben heute, mindestens zum Teil, gewisse Schutzfunktionen auszuüben. In den USA und anderen Ländern werden ganze Waldgebiete als Wasserschutzzonen der ordentlichen Nutzung entzogen. Die Forstleute dicht besiedelter Gegenden haben mehr zu tun mit dem Ansturm der Erholung suchenden Menschen als mit den eigentlichen traditionellen forstlichen Aufgaben. Aber auch der Wald wird durch die Industrialisierung, besonders durch deren Luftverschmutzung, stark in Mitleidenschaft gezogen. Molchanov berichtet, wie empfindlich der Wald auf Luftverschmutzungen, vor allem auf Abgase, Rauch usw. reagiert. Umgekehrt vermag er als Staubfilter die Verbreitung der Verschmutzung zu unterbinden. Der Forstwirtschaft und Landesplanung ist mit den (noch spärlichen) Erkenntnissen der forstlichen Hydrologie allein nicht geholfen. Wohl sind die hydrologischen Wirkungen unserer Bodennutzungsmassnahmen wichtig, schliesslich geht es aber um die Wirkung auf unseren ganzen Lebensraum. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse müssen deshalb direkt auch für die Planung ausgewertet werden. Clawson, Rubstov, Tsimek, Anuchin und Navon gehen auf die Methoden der Planung und Bewertung des Waldes sowie auf die Verwendung von Modellen für die Planung ein.

Die Bewertung des Wassers aus dem Wald stösst auf fast unüberwindliche Schwierigkeiten. Wie soll ein Produkt, welches noch nie mit Geld bewertet wurde, mit Wertzahlen eingeschätzt werden? Sein Preis oder Geldwert wird nicht nach Angebot und Nachfrage bemessen. Auch eine Bewertung nach Einnahmen und Ausgaben stösst auf Schwierigkeiten. Zudem gibt es viele alte Wasserrechte, die sich nicht leicht neuen ökonomischen Anforderungen anpassen lassen. Im weiteren ist die Wasserproduktion nicht konstant, ein zusätzlicher Umstand, der es der Praxis äusserst schwierig macht, Wasserertragsvermehrungen ökonomisch zu bewerten.

Es ist wenig ermutigend, durch Waldbehandlung die Wassererträge zu verbessern. Darüber trösten auch die neuesten Fortschritte der Modellrechnung, der Prognostizierung des Wasserertrages, der Voraussage der Auswirkungen verschiedenster und komplexer forstlicher Massnahmen nicht hinweg.

Grundlage solcher Prognosen und Planungsunterlagen für die Praxis sind die Klassifizierung, die Schaffung von Bereichen, Zonen, Typen und Einheiten. In der Forstwirtschaft wird eine Klassifizierung aus Gründen der Erfassung des Naturzustandes, der Wissenschaft, der Bewirtschaftung, des Rechtes, der Planung unter anderem vorgenommen. Dabei bleibt es eine wichtige Aufgabe der Wissenschaft, Unterlagen für die Praxis bereitzustellen.

Ausbildung und Forschung sind die beiden Pfeiler, auf welche jede Zu-

kunft der forstlichen Hydrologie (wie jedes anderen Wissenszweiges) bauen muss. Nur eine gute Basis der Ausbildung und Schulung sowie eine gründliche Forschungstätigkeit können die immer wichtiger werdenden Probleme lösen helfen. (Dils, Lositzky). Eine Reihe von Universitäten und Institutionen auf der ganzen Welt verfügen heute über ausgezeichnete Ausbildungsprogramme.

Die Anfänge der forstlichen Hydrologie gehen auf den Beginn dieses Jahrhunderts zurück: In Europa auf die Untersuchungen Englers im Emmental (Rappengraben, Sperbelgraben), in den USA auf die Studie von Bates und Henry im Wagon Wheel Gap (Colorado). Seit den dreissiger Jahren in den USA, den Nachkriegsjahren in der Sowjetunion und weltweit seit Beginn der sechziger Jahre haben die Probleme der forstlichen Hydrologie an Bedeutung und Wichtigkeit nicht nur bei den Spezialisten gewonnen, sondern besonders auch die Unterstützung durch die Öffentlichkeit und durch viele Regierungen gefunden. Die Probleme sind nicht überall gleich gelagert, lassen sich aber wie folgt zusammenfassen:

— Erhaltung oder Vermehrung des Wasserertrages
— Erhaltung oder Verbesserung der Wassergüte
— Förderung eines günstigen Abflussregimes (zeitliche Verteilung des Wasseranfalles)
— Schutz vor Erosion und Wildbächen.

Dies ist selbstverständlich keine Rangfolge. Es sind die regionalen Verhältnisse und die Bedürfnisse der Bevölkerung, durch welche die Prioritäten gesetzt werden. In vielen Ländern der Welt sind Programme für gute Ausbildung, zur seriösen Forschung und zur Behandlung der wichtigsten Probleme in Vorbereitung oder existieren bereits. In manchen Gegenden aber bedarf es noch grosser Anstrengungen, um den Problemen vermehrte Achtung zu verschaffen.

10. Zusammenfassung

Ob es sich um den Einfluss des Waldes auf den Wasserkreislauf oder um den Einfluss des Wassers auf die Waldentwicklung handelt, in beiden Fällen ist eine genaue Kenntnis des Wasserkreislaufes von grosser Bedeutung. Der Wald allein kann nicht den Erosions- und Hochwasserschutz garantieren, bautechnische Massnahmen, Aufforstungstechnik sowie ökonomische Gesichtspunkte sind heute ebensowichtig geworden. Der Wasserertrag kann durch den Waldanteil sowie durch dessen Behandlung beeinflusst werden. In Gebieten mit zu wenig verfügbarem Wasser kommt dieser Möglichkeit grosse Bedeutung zu. Dass dabei die Wasserqualität erhalten bleiben soll, ist eine Forderung, die nicht immer leicht zu erfüllen ist, da die Verminderung der Waldbestockung meist mit einer Reduktion des Erosionsschutzes verbunden ist. Ob ein Gewässer von chemischer und organischer Verschmutzung reingehalten werden kann, hängt von der Belastbarkeit des Boden-

körpers im Einzugsgebiet (Filterwirkung) ab. Jede Störung des Boden-Pflanzen-Stoffkreislaufes wirkt sich meist ungünstig auf die Wasserqualität aus. Der Wald setzt unter vergleichbaren Bedingungen von allen Vegetationsdecken am meisten Wasser um, er macht am wenigsten Wasser verfügbar. Dies ist durch Versuche in kleinen und mittleren Einzugsgebieten, durch energetische und thermodynamische Untersuchungen sowie Lysimeterversuche nachgewiesen worden. Die Wasserbewegung im Waldboden spielt dabei eine wichtige Rolle, sie ist vom Boden- und Bestandestyp sowie vom Klima abhängig. In Sumpfwäldern ist es möglich, durch künstliche Beeinflussung des Bodenwasserhaushaltes eine bedeutende Produktionssteigerung zu erwirken. In den meisten Fällen genügt eine wirksame Entwässerung des Humushorizontes. Die Erkenntnisse der forstlichen Hydrologie finden nicht nur in den erwähnten, eher traditionellen forstlichen Problemen Anwendung. Bei der Bewertung vieler Wohlfahrtsfunktionen, des Umweltschutzes, der Landesplanung, spielen solche Überlegungen eine zunehmende Rolle. Gute Ausbildung und seriöse Forschung auf dem Gebiet der forstlichen Hydrologie sind Voraussetzung für eine zeitgerechte Lösung unserer Wasserprobleme, sie geniessen bereits mancherorts eine verdiente Beachtung.

Résumé

L'influence de la forêt sur le cycle de l'eau

Qu'il s'agisse de l'influence de la forêt sur le cycle de l'eau ou de celle de l'eau sur le développement de la forêt, dans les deux cas, une connaissance exacte du cycle de l'eau a une importance primordiale. La forêt n'offre pas à elle seule une protection suffisante contre l'érosion ni contre l'inondation. Des mesures constructives, des techniques de reboisement et des considérations économiques sont devenues tout aussi importantes aujourd'hui. L'apport en eau peut être influencé par la répartition de la forêt, ainsi que par les interventions culturales. Dans les régions pauvres en eau, cette possibilité joue un rôle important. Le maintien de la qualité de l'eau est une exigence qui n'est pas toujours facile à remplir, étant donné qu'une diminution du taux de boisement est en général en étroite relation avec une augmentation de l'érosion. Dans le bassin de réception, l'action filtrante du sol est déterminante pour la pureté de l'eau au point de vue chimique et organique. Chaque perturbation du cycle sol-plante a une influence (presque toujours néfaste) sur la qualité de l'eau. Sous des conditions comparables, la forêt absorbe, de toutes les couvertures végétales, la plus grosse quantité d'eau et en libère le moins. Ceci a été démontré par des essais dans des petits et moyens bassins de réception, de même que par des analyses énergétiques et thermodynamiques et des mesures au lysimètre. Le mouvement de l'eau dans le sol forestier joue un très grand rôle, il dépend du sol, du type de peuplement ainsi que du climat. Dans les forêts marécageuses, il est possible d'obtenir une augmentation considérable de la production par une influence artificielle sur le régime de l'eau Dans la plupart des cas, un drainage efficace de l'horizon d'humus est suffisant.

La connaissance de l'hydrologie forestière ne trouve pas seulement une application dans les problèmes forestiers traditionnels cités. Ces réflexions jouent un rôle croissant dans l'estimation de beaucoup de fonctions sociales, de protection de l'environnement et d'aménagement du territoire. Une bonne formation et une recherche approfondie conformes à notre temps dans le domaine de l'hydrologie forestière sont un point de départ pour trouver une solution aux problèmes posés par l'eau ; ceux-ci bénéficient déjà dans divers endroits d'une attention bien méritée. *Trad. Lenz/Frei*

Liste der Referate

Anderson, H.: Der Wald und meteorologische Einflüsse auf Schnee- und Schmelzwasser

Anuchin, N. P.: Der gegenwärtige Stand der Schätzverfahren im Wald, des Analysensystems und des Vielfachmodells

Baumgartner, A.: Die Verdunstung des Waldes

Bochkov, A. P.: Der Einfluss des Waldes und seiner Behandlung auf die Wasserführung in Bächen

Clawson, M.: Die Planung der Bewirtschaftung bewaldeter Einzugsgebiete

Dils, R. E.: Ausbildung und Forschung auf dem Gebiet der forstlichen Hydrologie und der Bewirtschaftung von Einzugsgebieten

Dunford, E. G.: Probleme der Bewirtschaftung der Wälder zu vielfachem Nutzen

Federov, S. F.: Die Ergebnisse von Untersuchungen über die Elemente der Wasser- und Energiebilanz in kleinen bewaldeten Einzugsgebieten

Gubareva, V. A.: Die chemische Zusammensetzung der Niederschläge im Kronendach, in der Streue und im Boden

Hewlett, J. D.: Das Experiment, in Einzugsgebieten den Wasserertrag zu bestimmen

Kellere, H. M.: Wildbachverbau in den Alpen

Khanbekov, I.: Erosionsschutz und Wildbachverbauung im Gebirge mit biologischen und technischen Mitteln

Klawitter, R. A.: Die Drainage von Sumpfwäldern im Südosten der USA

Leyton, L., und *Rodda, J. C.:* Niederschlag und Wald

Lositzky, K. B., und *Korzjenevsky, Yu. S.:* Die Organisation der wissenschaftlichen Forschung über den Einfluss der Waldbehandlung auf Umweltsfaktoren in der Sowjetunion

Lull, H. W.: Möglichkeiten der Waldbewirtschaftung zur Erhöhung des Wasserertrages

Melekhov, A. A.: Die vielfältige Rolle des Waldes und seine Schutzfunktion

Molchanov, A. A.: Der Wasserkreislauf in verschiedenen natürlichen Zonen und in einigen Waldtypen

Molchanov, A. A.: Atmosphärische Verschmutzung durch Gase

Namba, S.: Hochwasser- und Erosionsschutz durch biologische und mechanische Mittel in erodierten Waldgebieten

Navon, D. I., und *Anderson, H.:* Moderne Methoden in der Planung der Bewirtschaftung natürlicher Resourcen

Nikolaenko, V. T.: Die Schutzfunktion der Baum- und Strauchvegetation und der Einfluss des Waldes auf die Wasserqualität

Popedinsky, A. V.: Der Einfluss der Holzhauerei auf die Regulierfunktion des Waldes

Rakhmanov, V. V.: Der Einfluss des Waldes auf den Abfluss im oberen Wolgagebiet

Rakhmanov, V. V.: Die Abhängigkeit der Abflussmenge vom Bewaldungsprozent in Einzugsgebieten

Rothacker, J. S.: Die Bewirtschaftung des Waldes im Hinblick auf Wasserqualität

Rubstov, V.: Die Organisation der Waldbehandlung und die Ausnützung der forstlichen Einflüsse auf die Umwelt in der Sowjetunion

Shumakov, V. S.: Eigenheiten der forstlichen Bodenphysik

Skorodumov, A. S.: Massnahmen gegen die Bodenerosion in der Waldsteppe

Subbotin, A. I.: Schmelzwasser und Gewitterabfluss in bewaldeten und unbewaldeten Einzugsgebieten

Tarrant, R. F.: Durch den Menschen beeinflusste Schwankungen der Wasserqualität in bewaldeten Einzugsgebieten

Tsimek, A. A.: Ökonomische und waldbauliche Zonierung im Hinblick auf eine rationelle Forstwirtschaft

Vompersky, S. E.: Die Drainage von Sumpfwäldern und ihr Einfluss auf die Hydrologie und Produktivität des Bodens

Voronkov, N. A.: Elemente der Feuchtigkeitszirkulation in Waldeinzugsgebieten

Zinke, P.: Die Bodenfeuchtigkeit im Wald