

Die zunehmende Bedeutung der Forsthydrologie im Klimawandel



Rheinland-Pfalz



Prof. Dr. Gebhard Schüler

Forschungsanstalt für
Waldökologie und
Forstwirtschaft
Rheinland-Pfalz, Deutschland

Gliederung der Präsentation



⇒ Bedeutung der Landnutzung

⇒ Wassermanagement und Forsthydrologie

⇒ Ökosystemdienstleistungen

⇒ Klimawandel

⇒ Dürre in der Mikro- und Makroskala

⇒ Vorbeugender Wasserrückhalt gegen Hochwasser und Sturzflutgefahr und für Grundwasserneubildung



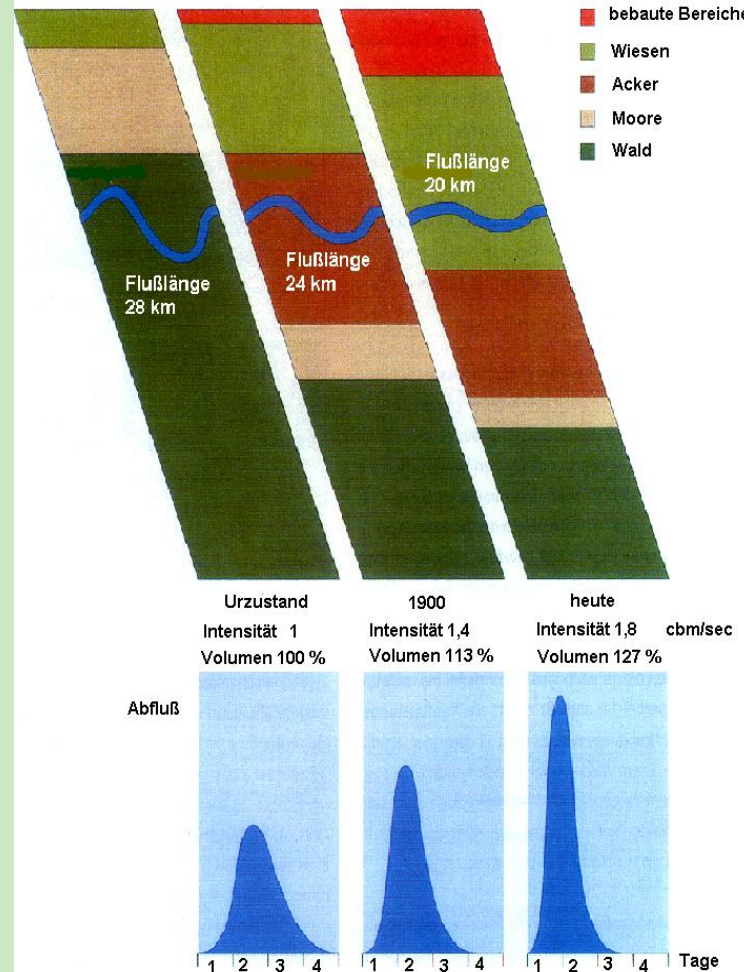
Die Menschen mach(t)en sich die Erde untertan



Ursprünglich war die Landschaft geprägt durch ausgedehnte Wälder und mäandrierende Flüsse in natürlichen Überschwemmungsgebieten.

Doch dann nutzten die Menschen das Land durch Landwirtschaft, Siedlungsflächen und Verkehrsinfrastruktur.

Ausbeutung der Landschaft steht zunehmend gegen naturnahe Landnutzung.



Die sich ändernde Flächennutzung von Wald zur Landwirtschaft und zu Siedlungsgebieten sowie Verkehrsflächen vermindern die Wasserversickerung und beschleunigen / steigern den Oberflächenabfluss.

Dabei sollte „künstlich“ abfließendes Wasser, bevor es richtig Fahrt aufnimmt, kontrolliert in den Wald zurückgeleitet werden, so dass es dort als Teil des naturnahen Wasserkreislaufes versickern kann.



Maßnahmen im Entstehungsgebiet des Abflussgeschehens

Nachhaltige Landnutzungsmaßnahmen müssen zum Ziel haben, Wasser in der Landschaft zu halten,

- zur **Wasserversorgung der Pflanzen** (auch Waldgesellschaften),
- zur Förderung der **Grundwasserneubildung**,
- zur **Ergänzung des herkömmlichen Hochwasserschutzes**

– bei **forstlicher und landwirtschaftlicher Nutzung und in Siedlungsbereichen/Verkehrsanlagen.**



Landnutzung im Wasgau 1950 (oben) und 1987 (unten) – Blick von der Burgruine Lindelbrunn zum Haselstein bei Oberschlettenbach



Hochwasser und Wassermanagement



Rheinland-Pfalz

Abfluss und Hochwasser sind natürliche Prozesse! Daher gilt grundsätzlich, dass Oberflächenwasser genügend Raum benötigt, um sich auszubreiten ... ohne Schäden anzurichten.

Wasser-Management ist daher mehr als Wasserbautechnik. Durch die Verbindung zur Landnutzung ist es in großen Regionen mit der Waldbewirtschaftung verbunden

Dabei muss die Kraft des Wassers (**Power of Water**) berücksichtigt werden!



Gebhard Schiller



Power of Water (I)



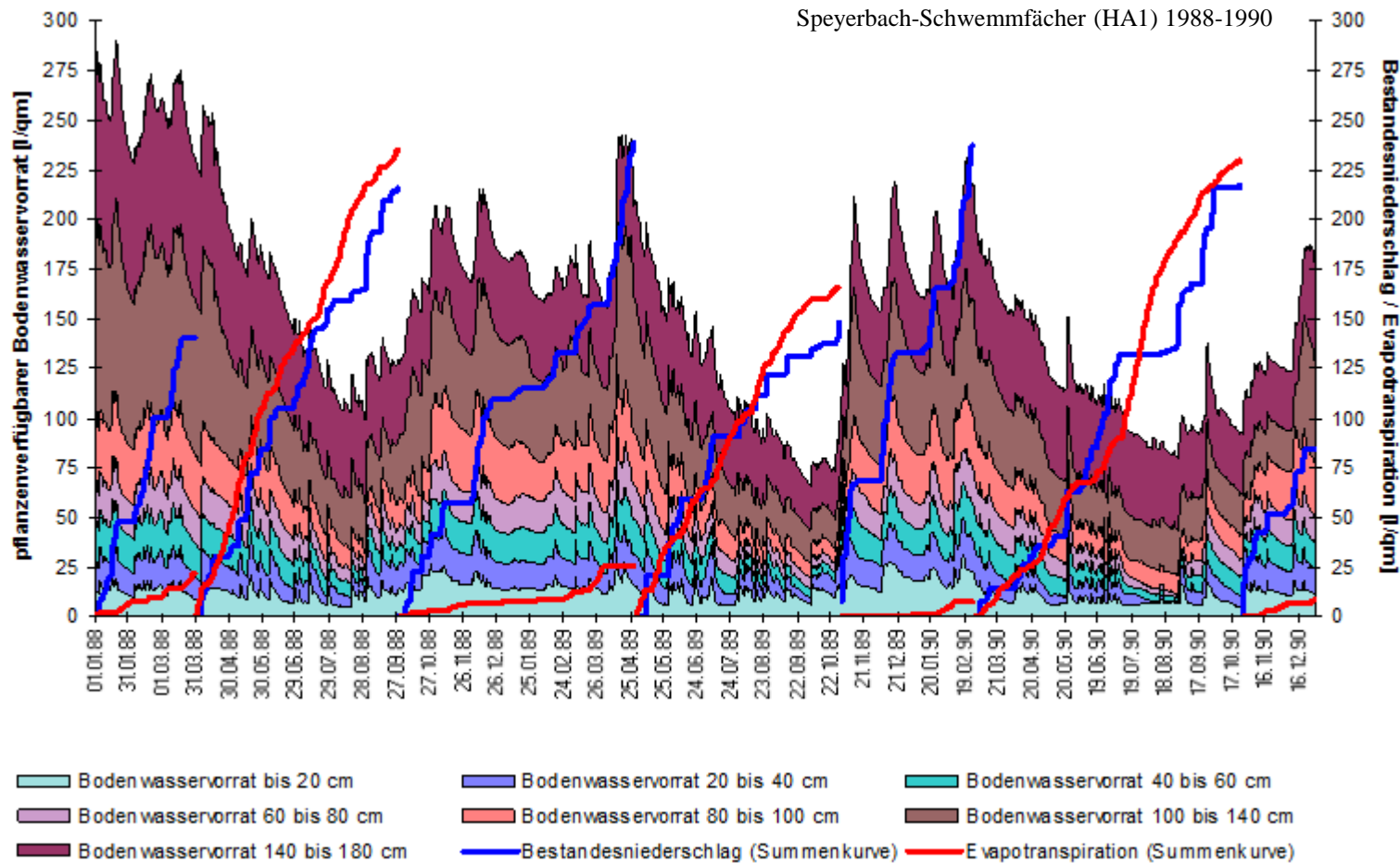
Die Forsthydrologie befasst sich mit dem Wasserhaushalt von Wäldern, insbesondere mit den Niederschlägen im und außerhalb des Waldes (Niederschlag, Schnee, Nebel, Interzeption), der Evapotranspiration, der Grundwasserneubildung, dem Abflussverhalten (Abfluss, Abflussprozess) in Abhängigkeit von Waldtypen (Baumartenzusammensetzung, Bestandestyp, Bestandesalter) und forstwirtschaftlichen Maßnahmen.

Insbesondere Klimawandel und rezente Waldschäden beeinflussen den Wasserhaushalt.

<http://www.geodz.com/deu/d/Forsthydrologie>



Der Bodenwasservorrat in Wäldern, abhängig von Niederschlag, Verdunstung und Abfluss, steuert die Grundwasserneubildung



Schüler 1999

Waldfunktionen - Waldökosystemdienstleistungen



Multifunktionale Waldbewirtschaftung



Ökosystemdienstleistungen des Waldes



(Malberg – historische Kultstätte und Ort von Mythen und Erzählungen)

Wald ist mehr als ein Holzproduzent. Der Wald als Ökosystem produziert eine Vielzahl wichtiger Leistungen für die Menschheit

- 1. Bereitstellende** Dienstleistungen (Holz, Wasser, medizinische Pflanzen, ...)
- 2. Regulierende** Dienstleistungen (CO₂-Bindung, Hochwasser- und Erosionsschutz, Verhinderung von Landdegradation, ...)
- 3. Unterstützende** Dienstleistungen (Biodiversität, Bodenbildung, Nährstoffkreislauf, Klima, ...)
- 4. Kulturelle** Dienstleistungen (Erholung, geistiges Erbe, Mythen und Erzählungen, ...)

MEA 2005

Inventur und Identifikation der wasserbezogenen **ÖSDL** des Waldes

- **Wasserrückhalt**
 - ➔ Verzögerte Abflussprozesse
- **Wasserreinigung**
 - ➔ Filter-Puffer-Transformator-Funktionen des Bodens
- **Grundwasserneubildung**
 - ➔ Tiefenversickerung

Direkte Nutzen

- **Trinkwasser**
- **Wasservorrat**
- Erholung, Gesundheit

Indirekte Nutzen

- Nährstoff-/Wasser-Kreislauf
- **Grundwasserneubildung, Wasserreinigung**
- **Dezentraler Hochwasserschutz, Eutrophierungsschutz**

Klimawandel – Herausforderung für den Wald und die Gesellschaft



Rheinland-Pfalz



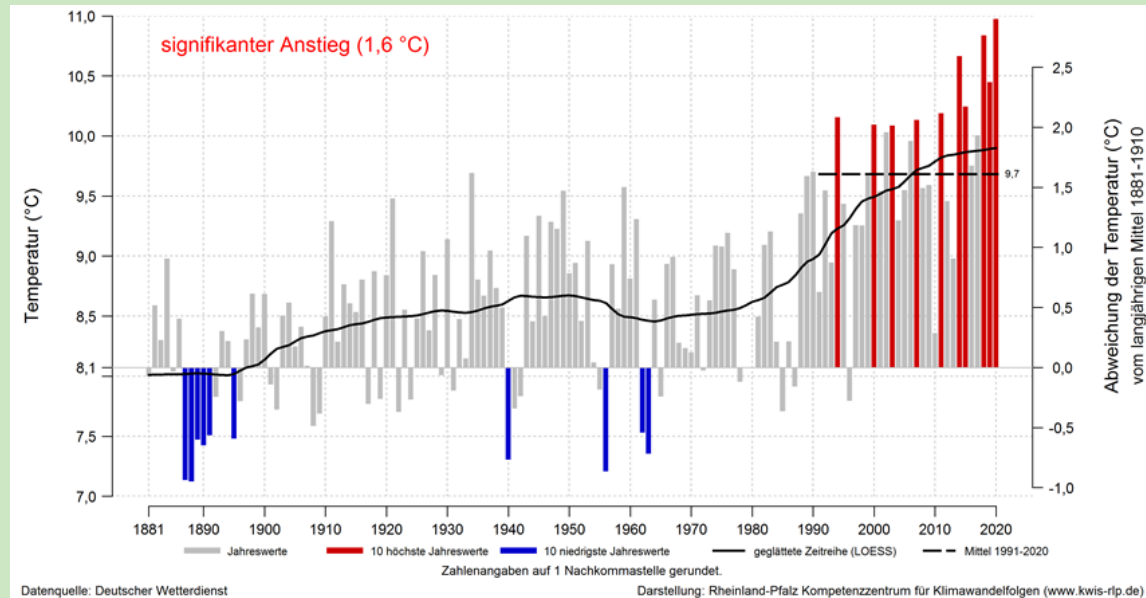
Je nachdem, wie sich der weltweite Ausstoß von Treibhausgasen entwickelt, gehen die Klimamodelle von einer Erhöhung der Jahresmitteltemperaturen von ca. 2-6 ° C bis zum Ende des 21. Jahrhunderts aus. Extremwetterereignisse wie Hitze, Dürre und Starkregen werden weiter zunehmen. In den Wintermonaten wird es (hoffentlich) mehr, in den Sommermonaten weniger (Stark-) Niederschläge geben.

<http://www.kwis-rlp.de/en/daten-und-fakten/klimawandel-zukunft/>

2018-2020 – Wetterkapriolen oder Klimawandel ? – mit Ansage aus den letzten 20 bis 30 (?) Jahren



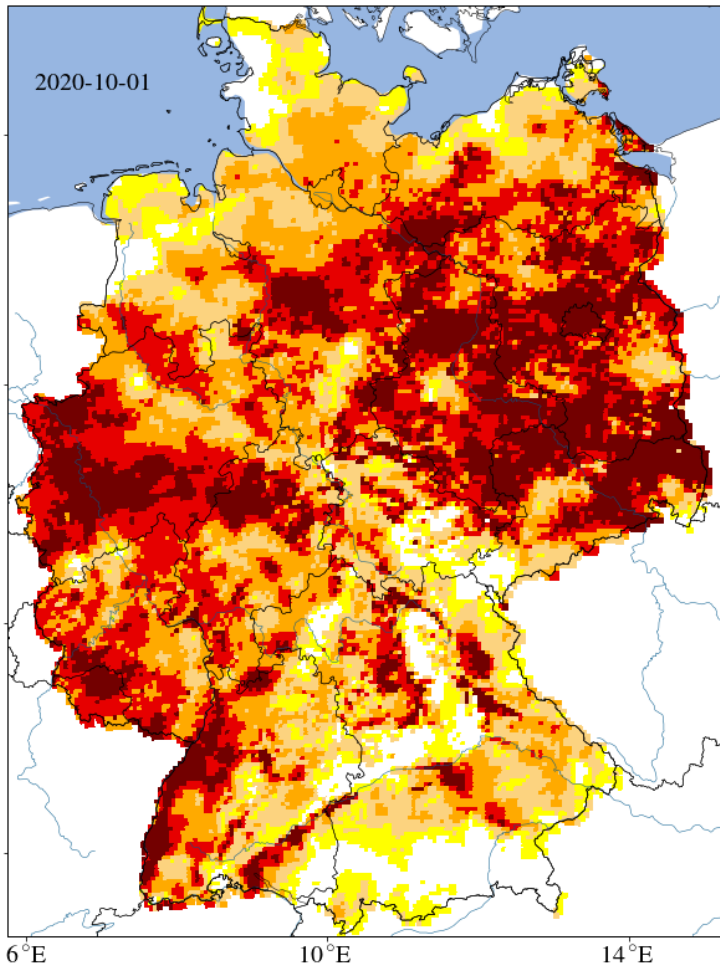
Mit der klimawandelbedingten Temperaturerhöhung der vergangenen Jahre, kam es insbesondere in den Trockenjahren 2018, 2019 und 2020 zu längeren Trockenperioden innerhalb der Vegetationsperiode, mit negativen Folgen für die klimatische Wasserbilanz in den Waldgebieten von Rheinland-Pfalz. Die Kombination aus höheren Lufttemperaturen und Trockenperioden erhöht die potentielle Evapotranspiration der Waldbestände bei gleichzeitig abnehmendem Bodenwasservorrat.



„Wir erleben die letzten Jahre eine Häufung klimatologischer Rekorde, die sich in der Summe nur mit dem Klimawandel erklären lassen. Für die Zukunft erwarten wir eine weitere Zunahme solcher Extremereignisse. Dies erfordert von uns allen intensivere Anpassungs- und Klimaschutzmaßnahmen.“

Extremwetter von 2018 – 2021

Dürre und Überschwemmungen



Die letzten Jahre heben sich durch deutlich wärmere Sommer mit Trockenperioden hervor.

Dadurch entwickelte sich – regional – eine starke Bodentrockenheit. Die Winterniederschläge haben nicht ausgereicht, um das jeweilige Wasserdefizit der Vorjahre auszugleichen.

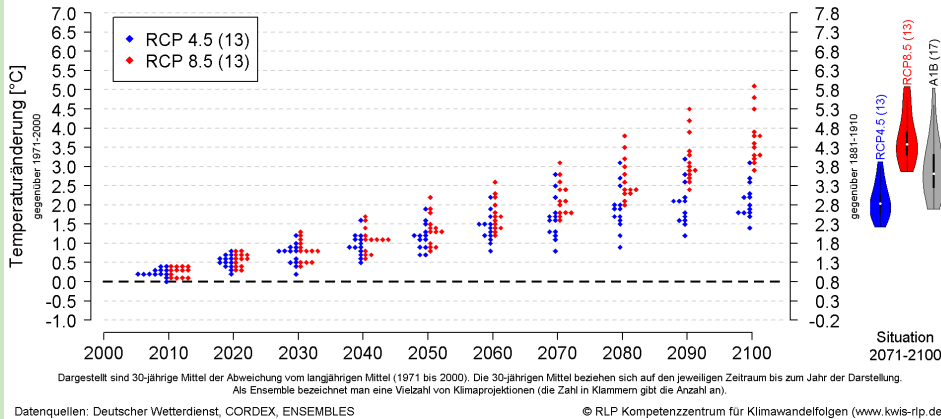
Allerdings fallen Regenereignisse in den Sommermonaten zunehmend als Extremereignisse aus, wobei das Wasser dann zu großen Anteilen oberflächlich abfließt.

- Das Wasser reicht nicht , um die pflanzenverfügbare Feldkapazität der Böden aufzufüllen !
- Es gibt nicht genug Wasser für die Grundwasserneubildung !
- Zu viel Wasser für die Infiltration verursacht Sturzfluten, Erosionen und Erdrutsche nach sintflutartigen Regenfällen !



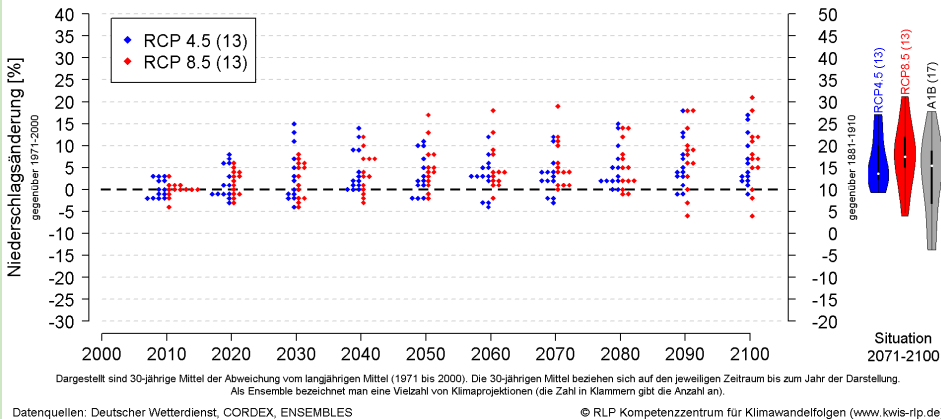
Klimawandel und Wald

Ensemble der Temperaturänderung im Kalenderjahr für Rheinland-Pfalz



Die zukünftigen Veränderungen der Niederschlagsverteilung über das Jahr und die Vegetationszeit hinweg, müssen im Zusammenhang mit steigenden Temperaturen gesehen werden. Die Zunahme von längeren Trockenphasen und steigende Temperaturen bewirken eine erhöhte Verdunstung, und - beides gemeinsam - eine Zunahme des Trockenstresses für Waldbäume.

Ensemble der Niederschlagsänderung im Kalenderjahr für Rheinland-Pfalz



Damit **KÖNNTE** sich die trockenheitsbedingte Waldgrenze von bisher etwa 400 Jahresniederschlag auf Jahressummen des Niederschlags von 500 (bis 600 ???) mm verschieben, also in untere oder sogar mittlere Höhenlagen unserer Mittelgebirge.

Reaktion der Bäume auf 2018 - 2020



Trockenheit und Hitze führten zum Tod / zu einer Vitalitätsschwächung der Bäume. Geschwächte Bäume sind anfälliger für Schaderreger, gleichzeitig begünstigen die höheren Temperaturen und die längere Dauer der warmen Jahreszeit die Entwicklung von Insekten und die Migration neuer Schaderregerpopulationen

MUEEF RLP 2019

Die Ambivalenz der Wälder angesichts der abnehmenden Wasserressourcen



Wälder sollen einerseits Schutzleistungen für die Wasserressourcen erbringen, aber andererseits wird die Vitalität der Wälder selbst durch die abnehmende Wasserverfügbarkeit beeinträchtigt.

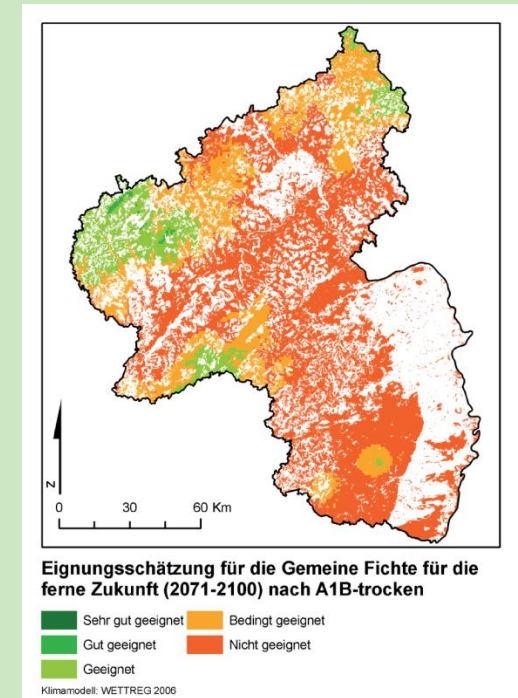
Angesichts der Prognosen zum Klimawandel muss der Wasserkreislauf der Wälder neu bewertet werden, und die Wald- und Wasserbewirtschaftung muss an Risiken angepasst werden, die in ihrem tatsächlichen künftigen Ausmaß noch ungewiss sind.



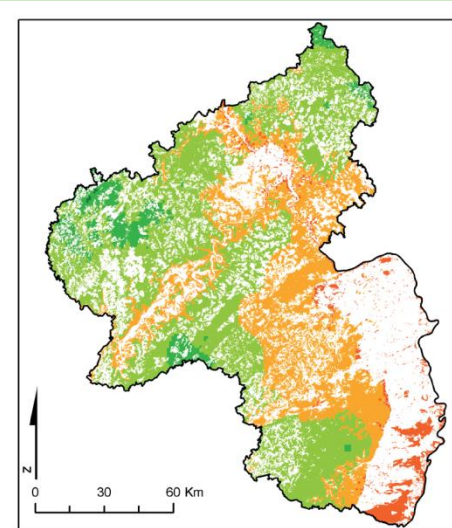
Die Fichte - Opfer von Klima und Borkenkäfer



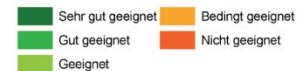
Die Baumart Fichte hat allenfalls in den Höhenlagen unserer Mittelgebirge Chancen trotz Klimawandel auszuharren.



Die Douglasie, eine „heimische“ Fremdländer-Baumart



Eignungsschätzung für die Douglasie für die
ferne Zukunft (2071-2100) nach A1B-trocken



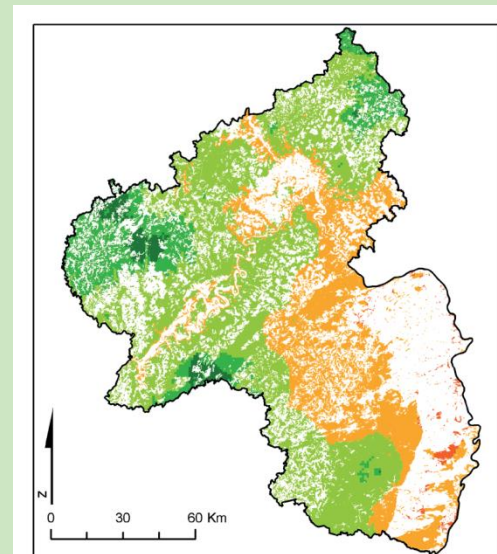
Klimamodell: WETTREG 2006

Die Douglasie kommt in ihrer N-amerikanischen Heimat in einer weiten Klima- und Standortsspreite vor. Die seit mehr als 100 Jahren in Europa bewährten Herkünfte sind aber nicht unbedingt an das sich hier ändernde Klima angepasst.

Die Douglasie eröffnet aber zusätzliche waldbauliche Alternativen.



Überlebende Kiefern müssen mit Pilzbefall, und anderen Kieferschädlingen kämpfen.



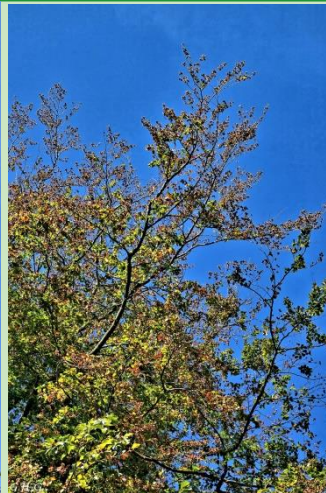
Eignungsschätzung für die Waldkiefer für die ferne Zukunft (2071-2100) nach A1B-trocken

	Sehr gut geeignet		Bedingt geeignet
	Gut geeignet		Nicht geeignet
	Geeignet		

Klimamodell: WETTREG 2006

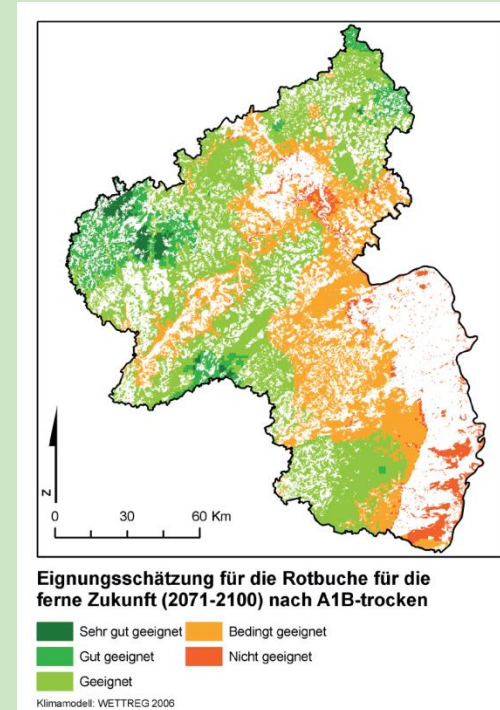
MUEEF RLP. 2019

Auch die Buche „hat Durst“



Die Buche, eine „Leitbaumart unserer natürlichen Waldgesellschaft“, fruktifiziert stark und vertrocknet im peripheren Kronenbereich.

„Jede legt noch schnell ein Ei, und dann kommt der Tod herbei.“



frei nach Wilhelm Busch 1865

Trockenheit verursacht Stress für ältere Buchen in ihrem natürlichen Verbreitungsgebiet



Rheinland-Pfalz



Stark freigestellte ältere Buchen zeigten nach Dürrejahre erhebliche Trockenstresssymptome. Wegen der starken Freistellung hat sich unter dem Kronendach der alten Buchen entweder eine dichte Buchenverjüngung oder eine Sukzession aus Begleitbaumarten, Straucharten oder auch ein dichter Graswurzelfilz etabliert. Obwohl die Buchenverjüngung unter den stark beanspruchten Altbuchen vereinzelt gelbe Blätter zeigte, waren die jungen Bäume noch weitgehend vital.

Schüler 2020

Trockenstress von Buchen nach Dürreperioden ... mikroskalige Effekte



Die aktuelle Evapotranspiration von Buchenbeständen nimmt mit zunehmender Durchforstung zunächst ab. Wenn die Durchforstung jedoch einen Schwellenwert überschreitet, steigt die aktuelle Evapotranspiration wieder an, da die Transpiration in der Waldbodenvegetation und die Verdunstung am Waldboden aufgrund der höheren Strahlungsenergie und der größeren Windbewegung zunehmen.

Wenn in Trockenperioden nur noch wenig Wasser aus dem Boden in die Wurzel nachgeliefert wird, steigt die Spannung in den wasserleitenden Gefäßen, und Embolien unterbrechen den Wasserfluss in die Buchenblätter.

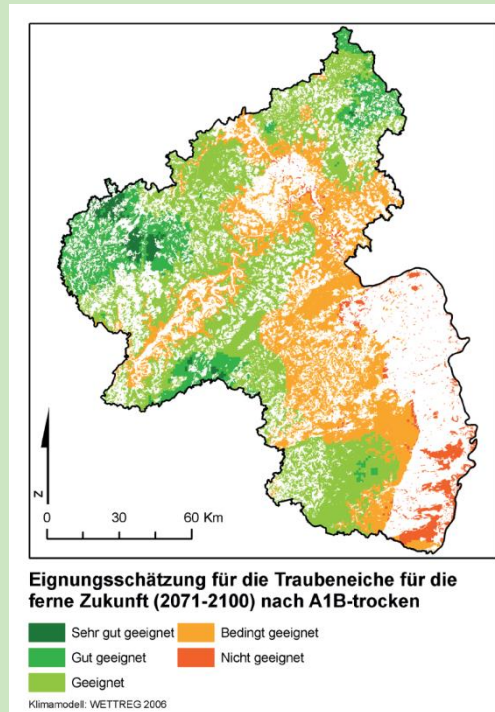
Als waldbauliche Konsequenzen für den Klimawandel ergeben sich ein naturnaher Waldbau, der sich an der Bestandesdynamik natürlicher Buchenbestände mit geschlossenem Kronendach orientieren muss, um ein feuchtes Bestandesinnenklima zu erhalten, und insbesondere eine Vergrasung der Bestände zu vermeiden.

Hacke & Sauter 1995, Nardini et al. (2001), Tyree & Zimmermann (2002), Cochard et al. (2004), McDowell et al. 2008, Johnson et al. 2012, Tomasella et al. 2019

Wie reagieren die Eichen?



Eiche



Die Eiche – eigentlich im Mischwald der Buche unterlegen – kann konkurrenzstärker werden.

Wenn jedoch zunehmend Eichen-Schaderreger auftreten (Eichen-Prachtkäfer, Eichen-Prozessionsspinner, Schwammspinner, z.T. in Kombination mit Mehltau) gerät auch die Eiche in Bedrängnis.

Verschiebung der natürlichen Verbreitung von Baumarten ... makroskalige Effekte



Werden die zukünftigen Vegetationsperioden deutlich trockener mit höheren Temperaturen, werden bisherige Buchenstandorte zunehmend von Eichen dominiert, wie die vergleichenden NemKlim-Studien in den rumänischen Karpaten nahelegen.

Der durch den Klimawandel verursachte Temperaturanstieg und die daraus resultierende erhöhte Evapotranspiration werden die Grenzlinie der Waldvegetationsgesellschaften z.B. mit dominanter Buche in höhere kühlere Lagen und in Regionen mit höheren Niederschlägen verschieben.

Thermophilere Waldgesellschaften, z.B. Eichenwälder, werden dann die bisherigen natürlichen Verbreitungsgebiete der Buchenwaldgesellschaften übernehmen.

Hohnwald et al. 2020, Soudzilovskaia et al. 2013

Kampf ums Wasser – Wasser für den Wald oder für den Menschen?



Wälder beziehen Wasser zum Überleben aus den oberen, nicht gespannten Grundwasserleitern. In den Waldgebieten entnimmt jedoch auch die Landwirtschaft Wasser für die Bewässerung ihrer Kulturen aus den oberen oder mittleren gespannten Grundwasserleitern. Diese Grundwasserleiter sind über hydraulische Fenster mit den oberen ungespannten Grundwasserleitern verbunden und trocknen aus. Die Bäume leiden dann unter Wassermangel oder sterben sogar daran.

Schueler 2020

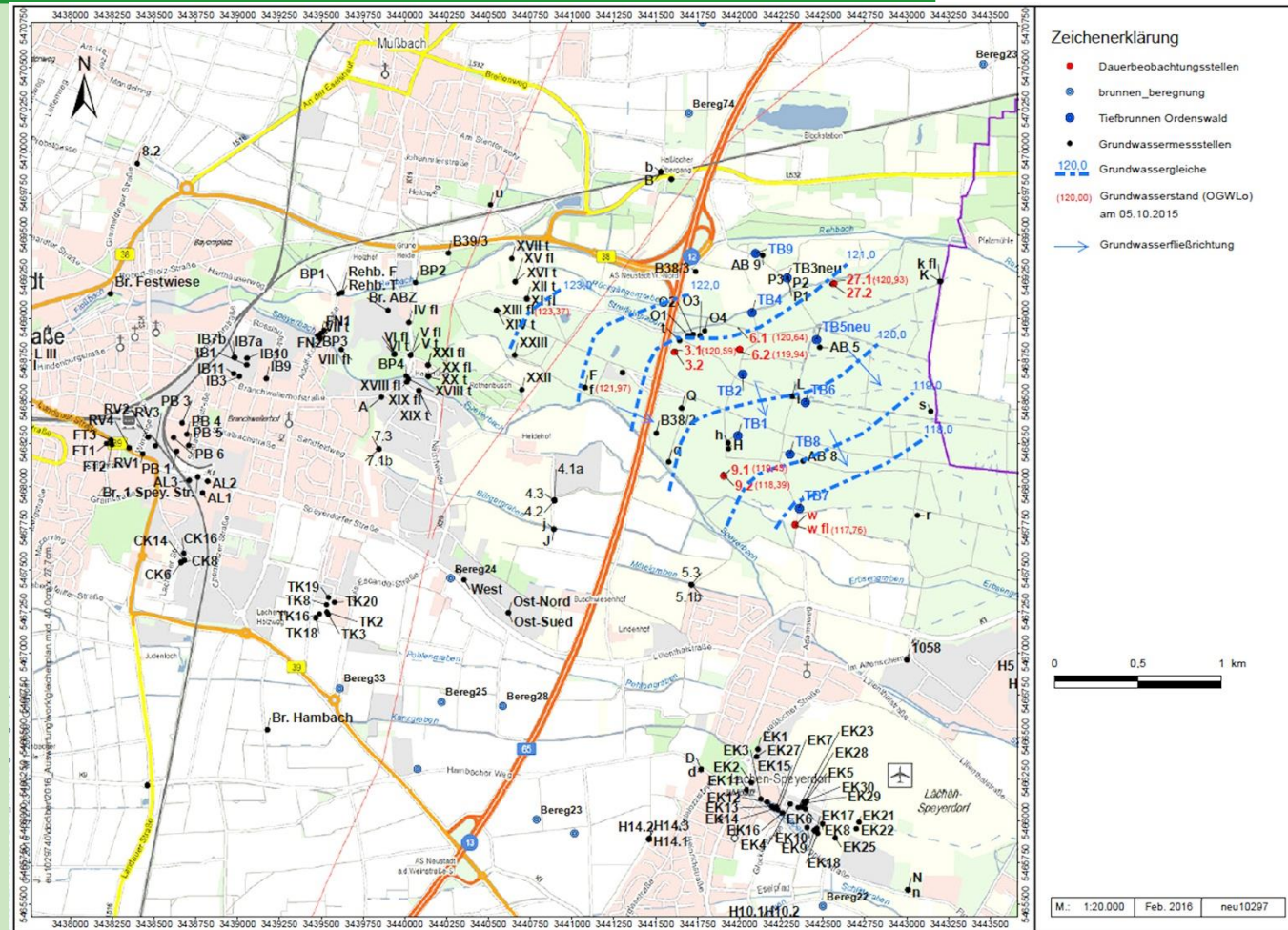
Die Lage und Anzahl der Grundwasser-entnahmestellen ist eine Existenzfrage



Wald gewährleistet GW von hoher Qualität. Die abnehmende GW-Neubildung und die hohe Nitratbelastung unter intensiv landwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen ist der Grund dafür, dass die Trinkwasserversorger eine große Anzahl von Brunnen in Wäldern installieren.

Wenn jedoch zu viel GW aus Tiefbrunnen entnommen wird, trocknen die oberen Grundwasserleiter aus.

Schueler 2020



Wenn dem Wald Wasser fehlt,



Rheinland-Pfalz



Wie lange dauert es bis den Menschen nicht mehr ausreichend Wasser zur Verfügung steht ???

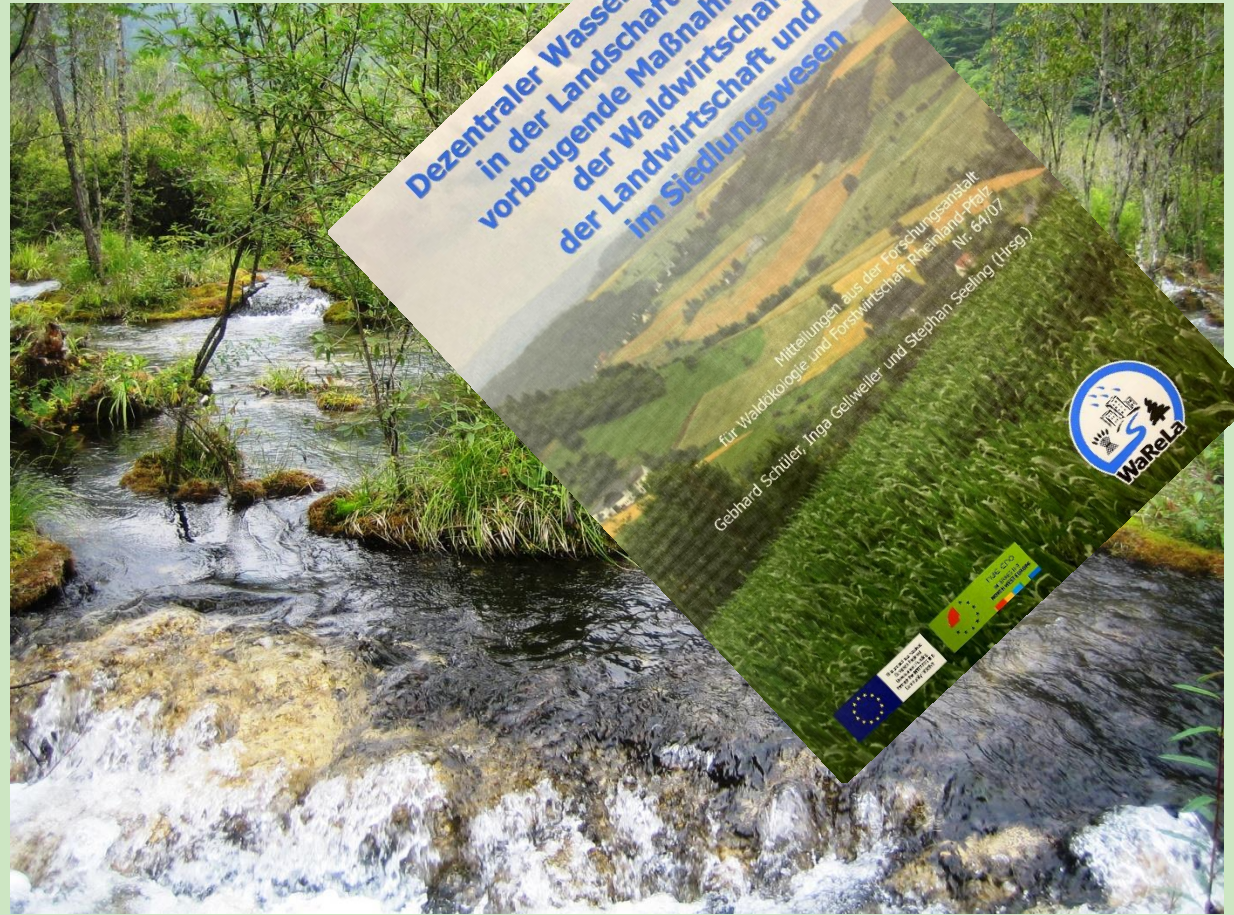


Schueler 2020

Was passiert, wenn zu schnell zu viel Wasser in der Landschaft ist?



Um Abflusspeaks zu vermeiden, und möglichst viel Wasser für die Wälder zur Verfügung zu haben, müssen sich Wald- und Wassermanagement auf die Wasserrückhaltung in bewaldeten Einzugsgebieten konzentrieren. Denn Wälder und Bäume brauchen Wasser für ihr Wachstum und ihr Überleben in Dürreperioden, und die Gefahr der Entstehung von Sturzfluten und Hochwasser kann verringert werden.



<https://fawf.wald.rlp.de/de/veroeffentlichungen/mitteilungen-aus-der-fawf/>

Im Klimawandel kann es auf **stark ausgetrockneten, dann hydrophoben Böden** zu einer verschlechterten Wasseraufnahme (Infiltration) kommen, so dass mit einer Erhöhung des Oberflächenabflusses, das Erosionsrisiko und die **Gefahr von Sturzfluten** zunehmen. Auch auf bereits mit Wasser gesättigten Böden können Sturzfluten entstehen.

Gleichzeitig haben Starkregen-Ereignisse aus konvektiver Bewölkung, die sich nur wenig bewegt hat, vermehrt zu Sturzfluten und menschengefährdenden **Überschwemmungen** geführt (<https://wasserportal.rlp-umwelt.de/servlet/is/10080/>).



Sturzfluten in Bächen und Flüssen verursachen erhebliche Schäden und werden in Zukunft wohl häufiger.

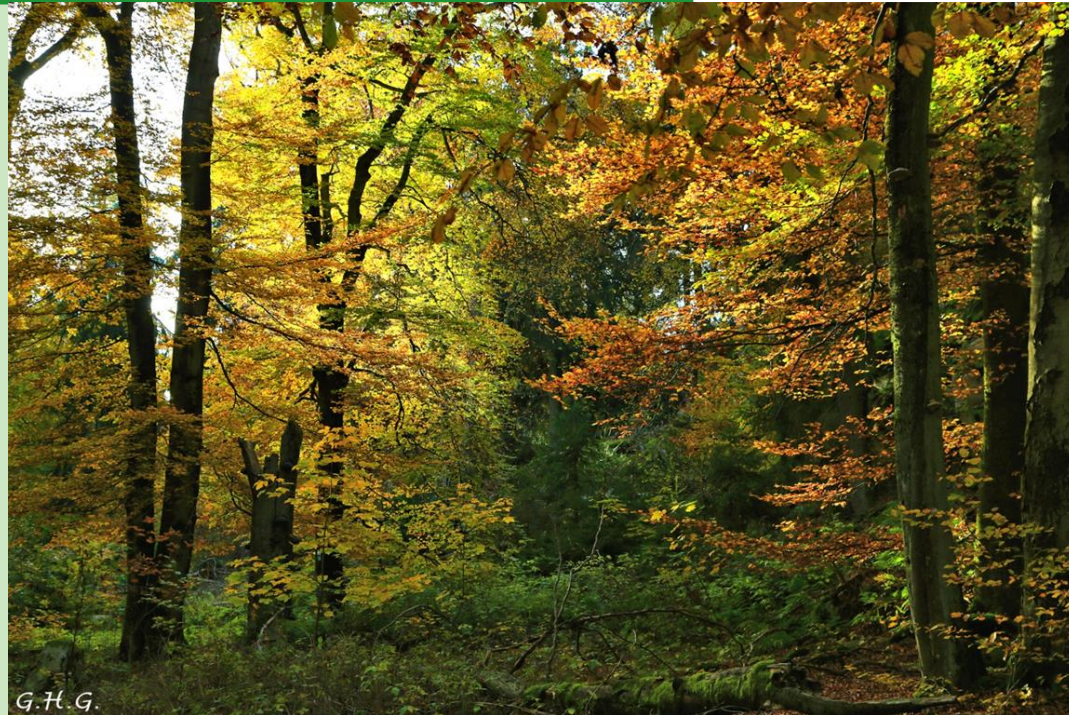
Sie haben nur eine **kurze Vorwarnzeit** – und technische Schutzmaßnahmen gibt es nicht überall und nicht in ausreichendem Ausmaß.



Beitrag des Waldes zum Hochwasserschutz

Wälder haben einen entscheidenden Einfluss auf den Abfluss von Wasser aus dem Wald und auf die Trink- und Brauchwasserversorgung über die Neubildung von Grundwasser. Durch das **Brechen der Niederschlagsenergie im Kronenraum** und durch **günstige Bodeneigenschaften für die Infiltration und Bodenwasserspeicherung** haben naturbelassene Wälder per se ein höheres, aber standortsabhängiges Wasserrückhaltevermögen (Retentionspotenzial) und leisten dadurch einen Beitrag zum dezentralen Hochwasserschutz.

(Peck & Mayer 1996; Schüler 2006; Bott 2002)



Der Schutz der Wasserressourcen im Wald ist untrennbar mit dem Bodenschutz zur Erhaltung intakter Bodenfunktionen verbunden.

(Schüler et al. 2002; Leuschner 1998)

Bewirtschaftete Wälder und Hochwasserschutz



Rheinland-Pfalz

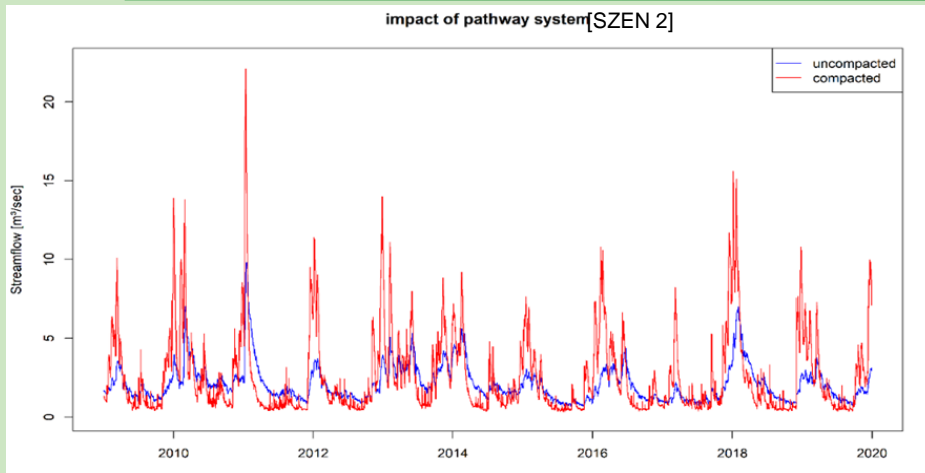


Die hohen Infiltrationsraten in natürlichen Wäldern verringern den Oberflächenabfluss und die Hochwassergefahren.

Feldstudien belegen jedoch, dass die mit der Waldwirtschaft verbundenen **LINEAREN** Infrastruktureinrichtungen – **Waldwege, (wegebegleitende) Gräben und Drainagesysteme, Befahrungslinien für maschinelle Holzernte und –vorlieferung** – die Entstehung von Oberflächenabfluss und die Gefahr von Hochwasser stärker beeinflussen als das Vorhandensein oder Fehlen von Wäldern selbst.

(Calder 2005, Schüler 2006)

Modellanwendung zur forsthydrologischen Folgenabschätzung



Mit dem parametrisierten und kalibrierten Modell SWAT+ lassen sich **hydrologische Folgen für Szenarien** einer unterschiedlich intensiven forstlichen Infrastruktur (Wege, Gräben, Rückegassen) für den Oberflächenabfluss oder für die Abflusspende in die Vorfluter eines Hydrotops in der Mesoskala rechnen, um so das Risiko der Entstehung von Sturzfluten einschätzen zu können.

Parameter	SZEN 1 (Baseline)	*	SZEN 2	SZEN 3	SZEN 4
Niederschlag [mm/a]	844-953 mm/a in den Jahren 2009-2019				
Oberflächenabfluss [mm/a]	21,73	Szenarien [Änderungen in % zur Baseline]	+39.6	+182	+182
Mittlere Abflusspende [m³/sec]	3,608		+28	+19	+14

- * - (SZEN 1) Wald ohne Infrastruktur
- (SZEN 2) Wald mit Forststraßen- und Wegenetz
- (SZEN 3) Wald mit Rückegassen-Netz bei Hangneigung < 20%
- (SZEN 4) Wald mit Rückegassen-Netz bei Hangneigung > 20 %

Bsp.: Hydrotop Bobenthal - Gewässersystem der Wieslauter

Management des Oberflächen(nahen)-Abflusses in der Forstwirtschaft





Wald der Zukunft für den Wasserrückhalt

Die günstigen Eigenschaften des Waldes im Hinblick auf den Wasserrückhalt und die Verminderung eines raschen Oberflächenabflusses sind nur solange wirksam, wie die Waldstandorte auch **tatsächlich mit Wald bedeckt** sind, der mit **standorts- und klimagerechten Baumartenmischungen** einen **ökologisch stabilen, intensiv horizontal und vertikal strukturierten Bestandaufbau** aufweist.

Vor dem Hintergrund eines sich rasch wandelnden Klimas muss die **Stärkung der Resilienz der Wälder** im Zentrum forstlicher Bemühungen stehen. Nach wie vorher stehen auf den Standort zugeschnittene Baumartenmischungen im Vordergrund, die auf den bisher hier vertretenen natürlichen Waldgesellschaften aufbauen, erkennbar standortwidrige Baumarten vermeidet und weniger empfindliche Baumarten in Bezug auf den Klimawandel einbindet. Im Sinne der **Risikostreung** wird die standortangepasste Einmischung von klimaresilienten Arten unter den Unsicherheitsbedingungen künftiger klimatischer Entwicklungen in der Bedeutung zunehmen, da eine strukturell und genetisch diversifizierte Waldgesellschaft ein **breiteres Reaktionsspektrum** auf potenzielle Veränderungen der Lebensumwelt aufweist.

Strukturierte Wälder mit einem hohen Anteil an dienenden und nachwachsenden Bäumen mindern die Energie von Starkregenereignissen, fördern ein Versickern von Oberflächenwasser und reduzieren das Risiko eines raschen oberflächlichen Abflusses.

Waldmanagement unter Klimawandel-Bedingungen



Die Prinzipien von Waldmanagement unter Klimawandel-Bedingungen lauten **"no-regret" Entscheidungen mit breiter Risikostreuung:**

- klimaresiliente, vitale und standortsangepasste Mischwälder mit heimischen Hauptbaumarten
- ergänzende Nebenbaumarten können aus Wuchsgebieten eingeführt werden, die ein Klima aufweisen, wie das, was wir im Klimawandel erwarten

Eine große Bandbreite an Klima-projektionen und die Erbringung verschiedener Ökosystemdienstleistungen ist dabei zu berücksichtigen.

Forsthydrologie ist eine Schlüsselwissenschaft bei der Klimawandel-Anpassung.

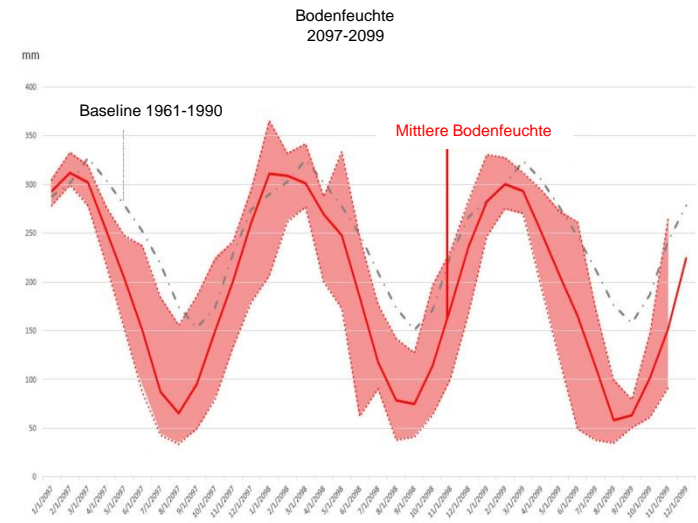
Modellanwendung zur forsthydrologischen Folgenabschätzung im Klimawandel



Änderungssignale von Wasserhaushaltsgrößen in der rezenten Periode 2000-20 und in den Klimaszenarien 2031-50 und 2071-99 im Biosphären-Reservat Pfälzerwald

	1961-1990		2000-2020		RCP2.6/RCP8.5			
	Bezugsperiode	Absolutwerte	% zur Bezugsperiode	2031-2050		2071-2099		
				worst case	best case	worst case	best case	
Niederschlag [mm]	1184.56	821.38	-30.66	-36.37	-3.77	-36.01	2.02	
aktuelle ET [mm]	707.13	635.7	-10.10	-15.07	3.48	-31.70	4.11	
Bodenfeuchte [mm]	246.08	164.17	-33.29	-34.52	-7.52	-38.50	-6,90	
Grundwasser-Neubildung [mm]	285.7	177.6	-37.8	-39.45	-9.23	-41.18	2.07	
Oberflächenabfluss [mm]	30	12.47	-58.43	-13.30	-62.18	28.90	-63.13	

Mit dem parametrisierten und kalibrierten Modell SWAT+ lassen sich **forsthydrologische Folgen für Zukunfts-Szenarien** rechnen.



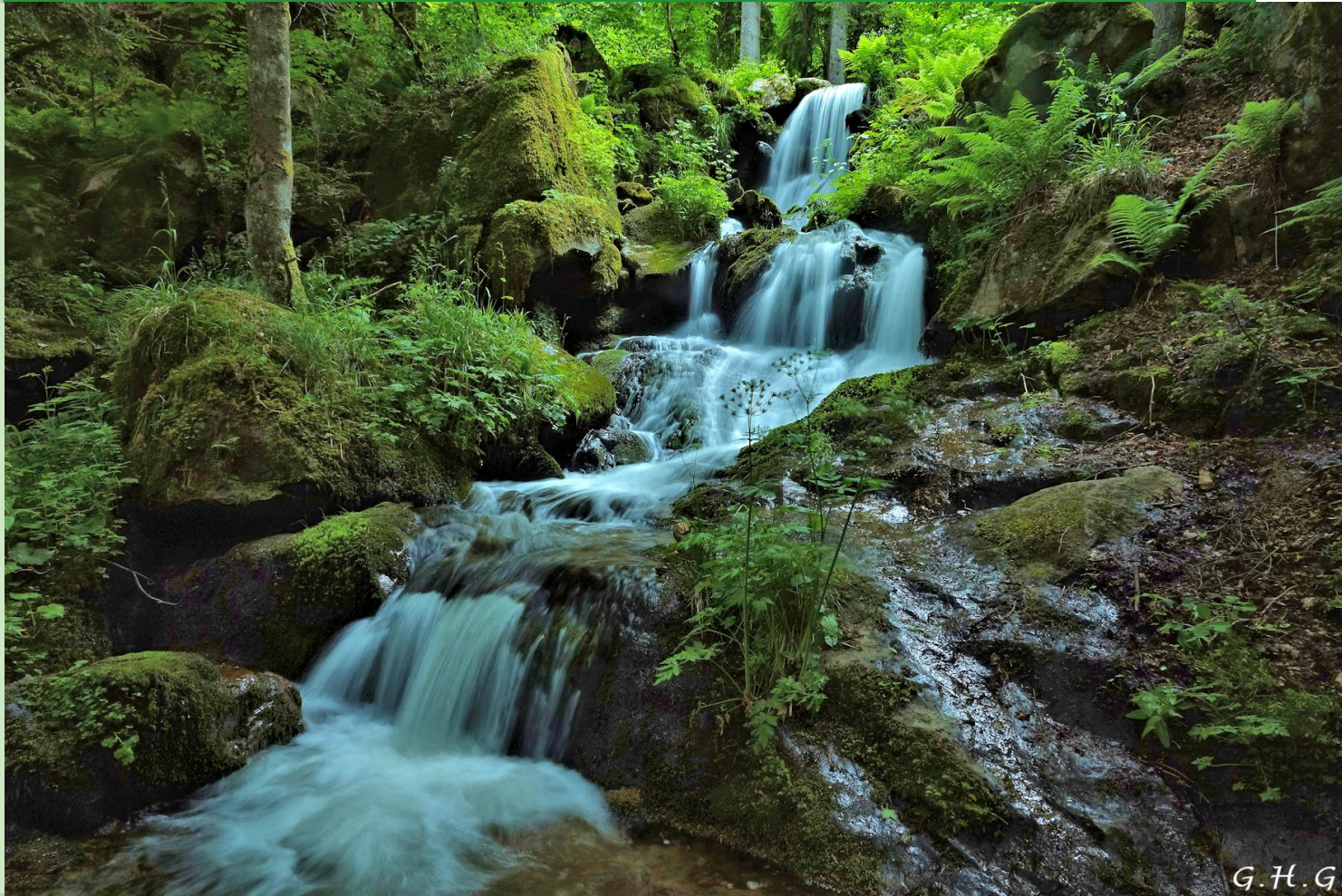
Die Grundwasserneubildung dokumentiert im "best case" einen Kipp-Punkt, wenn eine erhöhte Verdunstung über den Meeren stärkere Winterniederschläge auslösen, die die erhöhte Verdunstung über Land kompensieren.

Der Waldboden trocknet allerdings früher im Jahr und stärker aus. Damit sind die Bäume stärkerem Trockenstress ausgesetzt.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Rheinland-Pfalz



G. H. G.



Landesforsten
Rheinland-Pfalz



Literatur 1

- Backes, C., Gallus, M., Schubert, D., Schüler, G. & Vasel R. (2007):** Entschärfung von linearen Abflüssen durch vorsorgende Waldwegebautechnik. In: Schüler et al (2007), s.u. (S. 51-60)
- Benecke, P. (1990):** Versickerung und Bodenfeuchte. In: Allgemeine Hydrologie. Lehrbuch der Hydrologie, Bd. 1, Quantitative Hydrologie (Baumgartner A. & Liebscher H.-J., eds.) Gebr. Borntraeger Vlg. Berlin, Stuttgart, 373-403.
- Bott, W. (2002):** Prozessorientierte Modellierung des Wassertransports zur Bewertung von Hochwasserschutzmaßnahmen in bewaldeten Entstehungsgebieten. PhD thesis, Univ. Mainz, pp 114.
- Brechtel, H. (1973):** Ein methodischer Beitrag zur Quantifizierung des Einflusses verschiedener Baumarten und Altersklassen auf die Grundwasserneubildung in der Rhein-Main-Ebene. Z.d.Geol.Ges., 124, 593-605.
- Calder, I.R. (2005):** Blue Revolution – Integrated Land and Water Resource Management. Earthscan London • Sterling, VA, Forests and Water: Myths and Mother Statements, 29-63.
- Cochard, H., Froux, F., Mayr, S. & Coutand, C. (2004):** Xylem wall collapse in water-stressed pine needles. Plant Physiol., 134, 401–408.
- Daily, G.C. (1997)** Introduction: What Are Ecosystem Services? In: Daily, G.C., Ed., Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems, Island Press, Washington DC, 1-10.
- De Groot, R.S., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L. & Willemen, L. (2010):** Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.10.006>.
- Delfs, J., Friedrich, W., Kieseckamp, H. & Wagenhoff A. (1958):** Der Einfluss des Waldes und des Kahlschlages auf den Abflussvorgang, den Wasserhaushalt und den Bodenabtrag. Mitt. Niedersächsischen Landesforstverwaltung, H. 3.
- Elling, W., Haeckel, H. & Ohmayer, G. (1990):** Schätzung der aktuell nutzbaren Wasserspeicherung des Wurzelraums von Waldbeständen mit Hilfe eines Simulationsmodelles. Forstw. Cbl., 109, 210-219.
- Gallus, M., Ley, M., Schubert D., Segatz, E. & Schüler G. (2007):** Renaturierung von Hangbrüchern im Hunsrück zur Glättung von Abflussspitzen. In Schüler et al. 2007, s.u. (S. 21-30)
- Hacke, U. & Sauter, J.J. (1995):** Vulnerability of Xylem to embolism in relation to leaf water potential and stomatal conductance in *Fagus sylvatica* f. *purpurea* and *Populus balsamifera*. J. of Experimental Botany, 46, 1177-1183.
- Haines-Young, R. & Potschin-Young, M.B. (2010):** The links between biodiversity, ecosystem service and human well-being. In: Raffaelli, C.L.J., D.G. and Frid (eds.): Ecosystem Ecology: A New Synthesis (pp.110-139), Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CBO9780511750458.007.
- Hohnwald, S., Indreica, A., Walentowski, H. & Leuschner, C. (2020):** Microclimatic Tipping Points at the Beech-Oak Ecotone in the Western Romanian Carpathians. Forests, 11, 919; doi: 10.3390/f11090919.
- Huemann, M., Schueler, G., Mueller C., Schneider, R., Johst, M. & Caspari, T. (2011):** Identification of runoff processes – The impact of different forest types and soil properties on runoff formation and floods. J.of Hydrology, doi. 10/1016 / J.Jhydrol. 20122.08.067.

- Johnson, D.M., McCulloh, K.A., Woodruff, D.R. & Meinzer, F.C.** (2012): Evidence for xylem embolism as primary factor in dehydration-induced declines in leaf hydraulic conductance. *Plant Cell Environ.*, 35,760–769.
- Klaes, B., Struck, J., Schneider, R. & Schueler, G.** (2016): Middle-term effects after timber harvesting with heavy machinery on a fine-textured forest soil. *Eur J Forest Res.* DOI 10.1007/s10342-016-0995-2.
- MA - Millennium Ecosystem Assessment** (2003): *Ecosystems and their services. A framework for assessment.* Island Press.
- MA - Millennium Ecosystem Assessment** (2005): *Ecosystems & Human Well-being. Synthesis Reports.* Island Press.
- McDowell, N., Pockman, W.T. & Allen, C.D.** (2008): Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytol.*, 178, 719–739.
- Nardini, A., Tyree, M. & Salleo, S.** (2001): Xylem cavitation in the leaf of *Prunus laurocerasus* and its impact on leaf hydraulics. *Plant Physiol.*, 125,1700–1709.
- Peck, A.K. & Mayer, H.** (1996): Einfluss von Bestandesparametern auf die Verdunstung von Wäldern. *Forstw. Cbl.*, 115, 1-9.
- Penman, H.L.** (1948): Natural Evapotranspiration from open water, bare soil and grass. *Proc.Roy.Met.Soc.*, A, 193, 120-145.
- Salihi, O.O.A.** (1984): Potentielle Verdunstung eines Buchen- und eines Fichtenwaldes auf der Basis von Daten des Deutschen Wetterdienstes als Parameter der aktuellen Evapotranspiration. *Diss. a.d.Univ. Göttingen*, pp 106.
- Sartor, J. & Kreiter, T. (2007):** Hochwasserrückhalt durch naturnahe Waldwirtschaft und Kleinrückhalte. In: Schueler et al. (2007) s.u. (S. 61-72).
- Schobel, S.** (2008): Infiltrations- und Bodenabflussprozesse in Abhängigkeit von Landnutzung und Substrat in der Trier-Bitburger Mulde. *Diss. a.d. Univ. Trier.* 186 S.
- Schüler, G.** (1999): Schwemmfächer im nördlichen Oberrheingraben als Waldstandorte – Die Bedeutung der Standortfaktoren für Stabilität und Elastizität der Waldökosysteme unter besonderer Berücksichtigung des grundwassergeprägten Wasserhaushaltes am Beispiel des Speyerbach-Schwemmfächers. *Mitteilungen der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz*, Nr. 16, pp186.
- Schüler, G.** (2006): Identification of flood-generating forest areas and forestry measures for water retention. *For.Snow Landsc. Res.*, 80, 1: 99-114.
- Schüler, G., Gellweiler, I. & Seeling, S.** – eds. (2007): Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen. *Mitt. A. d. Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz*, Nr. 64, pp 337.
- Schüler, G.** (2020): Gutachten zum Trockenstress 2018-2020 (not publ.)
- Schüler, G., Kopf, C., Gorecky, A., Krüger, J-P., Dotterweich, M., Seifert-Schäfer, A., Hoffmann, S., Scherzer, J., Kneisel, C., Trappe, J., Hill, J., Stoffels, J., Dotzler, S., Nink, S., Hölzer, A., Schloß, S., Dehner, U. & Steinrücken, U. (2020):** Die Hangbrücher des Hunsrücks. *Mitt. aus der FAWF*, Nr. 86/20, 102 S
- Schultze, B. & Scherzer, J. (2009):** Wasserhaushaltsuntersuchungen an Waldstandorten in Rheinland-Pfalz für den Zeitraum 2007/2008. *Forschungsber. der UDATA an die FAWF*, 162 S.



Schwertmann, U. & Vogl, W. (1987): Bodenerosion durch Wasser – Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Ulmer-Verlag, Stuttgart.

Segatz, E. (2007): Die Renaturierung eines Teilstückes der Lauter – eine Maßnahme des vorsorgenden Hochwasserschutzes im Bereich des Oberlaufes von Flüssen. In: Schueler et al. (2007), s.o. (S. 73 – 82)

Soudzilovskaia, N.A., Elumeeva, T.G., Onipchenko, V.G., Shidakov, I.I., Salpagarova, F.S., Khubiev, A.B., Tekeev, D.K. & Cornelissen, J.H. (2013): Functional traits predict relationships between plant abundance dynamic and long-term climate warming. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110, 18180–18184.

Tomasella, M., Nardini, A., Hesse, B.D., Machlet, A., Matyssek, R. & Häberle, K.H. (2019): Close to the edge: effects of repeated severe drought on stem hydraulics and non-structural carbohydrates in European saplings. *Tree Physiol.*, 00, 1-12. doi: 10.1093/treephys/tpy142.

Tyree, M.T. & Zimmermann, M.H. (2002): Xylem structure and the ascent of sap, 2nd edn. Springer Vlg, Berlin.

Van Oudenhoven, A.P.E., Petz, K., Alkemade, R., Hein, L. & de Groot, R.S. (2012): Framework for systematic indicator selection to assess effects of land management on ecosystem services. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.01.012>.