



Transgene Energiepflanzen und Bäume - Aktueller Stand und Probleme aus Naturschutzsicht

Deutscher Naturschutztag, Karlsruhe 19. 09. 2008

Martha Mertens, BN/BUND

Energiepflanzen für den Klimaschutz?

EU

- **RL 2003/30/EC: 5,75 % Agrospritanteil bis Ende 2010,**
- **EU-Beschluss 08.03.2007: 10 % Agrospritanteil bis 2020**

Deutschland

- **1,77 Mio ha Energiepflanzen in 2007 – insbesondere Raps (1,12 Mio ha, Biodiesel) und Mais (~250 000 ha, Biogasanlagen)**

USA

- **Energy Policy Act: 10 % Ethanolanteil bis 2007**
- **Präsident Bush Januar 2007: 20 % Agrospritanteil bis 2017 (2007 US Sprit-Gesamtverbrauch 540 Mrd Liter/Jahr)**
- **2008 ca. ein Drittel der Maisfläche (= 40 Mio ha) für Ethanolproduktion**

„Bioethanol“-Produktion global (2006) ~50 Mrd Liter (USA/Brasilien 70%)

„Biodiesel“-Produktion global (2006) ~7,3 Mrd Liter (EU 77 %)



Transgene Energiepflanzen?

Sonnleitner, DBV: Bei Rohstoffherzeugung bietet Gentechnik große Möglichkeiten; Mais, Kartoffeln und Zuckerrüben sind dabei interessante Ackerfrüchte (2006)
Gabriel, Umweltminister: Chancen der Gentechnik bei Gewinnung von Energie und Rohstoffen (März 2006)

FAO Biotechnology Forum zu „Biotechnologie und Bioenergie/Agrosprit in Entwicklungsländern“

Zur energetischen Nutzung geeignete, im Anbau befindliche transgene Pflanzen

- **Herbizidresistenter RR-Mais* bzw. LL-Mais,**
- **insektenresistenter Bt-Mais**, Ethanol-Mais**
- **RR-Raps, LL-Raps**
- **RR-Soja**

In der EU ist derzeit nur MON810 Bt-Mais* zum Anbau zugelassen, Verbot von MON810 Mais in einigen EU-Ländern (z. B. A, F, Hu, Gr)

Deutschland 2008: 3 179 ha MON810 Mais (v. a. Brandenburg, Sachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt) <http://www.standortregister.de/>

- * RR = Resistenz gegen Glyphosat (Roundup), LL = Resistenz gegen Glufosinat (Liberty)
- ** Bt = *Bacillus thuringiensis*, Resistenz gegen Maiszünsler und/oder Maiswurzelbohrer



Transgene Energiepflanzen

Wichtige Pflanzenarten

- Mais
- Raps
- Soja
- Zuckerrüben
- Kartoffeln
- Weizen
- Gräser

- Zuckerrohr
- Mohrenhirse

Angestrebte neue Eigenschaften (neben Herbizid-/Insektenresistenz)

- **Stresstoleranz (Trockenheit, Hitze, salzige Böden, Kälte)**
- **Pathogenresistenz (Viren, Pilze, Bakterien)**
- **Stickstoff-Assimilation**
- **Effizientere Photosynthese**
- **Veränderte Relation von Zellulose/Hemizellulose zu Lignin (für Ethanolproduktion)**



Transgene Bäume

Projekte in der EU:

**Belgien, Dänemark, Deutschland,
Finnland, Frankreich,
Großbritannien, Schweden**

- **Birke**
- **Eucalyptus (S)**
- **Fichte**
- **Gummibaum (F)**
- **Nordmanntanne**
- **Pappel**
- **Ulme**

>200 Freisetzungen weltweit

Angestrebte Eigenschaften

- **Herbizidresistenz**
- **Insektenresistenz**
- **Pilzresistenz**
- **Weniger/veränderte Lignine**
- **Wachstumsbeschleunigung**
- **Längere Fasern**
- **Frühere Blütenbildung**
- **Unterdrückung der Blüte**
- **Einfachere Hydrolyse der Kohlenhydrate**
- **Effizientere Photosynthese**
- **Verzögerter Nadelabfall**
- **Bodenentgiftung**



Transgene Pappeln

Pappel als Modellorganismus für transgene Bäume:

- Relativ kleines Genom
- Genom sequenziert
- Genetische Kartierung
- Bildung von Klonen
- Einfache Transformation
- Wissenschaftliches Netzwerk

Domestizierte Pappelklone?

- **Kurzer, dicker Stamm**
- **Weniger, kleinere Äste**
- **Bedingt lichtbedürftig → hohe Pflanzdichte möglich (1,2 x 2,5 m)**
- **Früher Austrieb, später Blattfall**
- **Schädlingsresistenz**
- **Keine Blütenbildung**
→ mehr Biomasse im Stamm,
→ kein Pollentransfer
- **Zellwände angepasst an unterschiedliche Nutzungswünsche**
- **Kein Überleben in der Natur**
- **Schnelle Rotation (5 Jahre)**



Ökologische Wirkungen von GVO

- **Gentransfer:**
 - Kreuzung mit Kultur- und Wildarten
 - horizontaler Gentransfer (Mikroorganismen)
- **Ausbreitung in andere Ökosysteme**
- **Effekte auf Nichtziel-Organismen**

- **Sekundäre Effekte durch Herbizideinsatz und Resistenzentwicklung**
- **Förderung von Monokulturen und Intensivierung der Landwirtschaft?**

- **Einschätzung der Umwelt-Risiken durch Wissenschaftler abhängig von Arbeitsplatz und Fachdisziplin?**


EU verlangt lt. Freisetzungsrichtlinie 2001/18 bzw. Verordnung 1829/2003

- **Prüfung direkter, indirekter, sofortiger und späterer Folgen sowie kumulativer langfristiger Auswirkungen auf Umwelt und menschliche Gesundheit**
- **Verfahren „Step-by-Step“ und „Case-by-Case“**
- **Beobachtung nach Marktzulassung von GVO (Monitoring)**

Unerwartete Effekte der Transformation

Transformation kein gezielter Prozess: Veränderung der Aktivität anderer pflanzlicher Gene, Eingriff in Stoffwechselprozesse?

- **Basis der Gentechnik: „ein Gen-ein Protein“- Modell; komplexe Steuerung der Genaktivität nicht wirklich berücksichtigt**
- **Einbau mehrerer Transgen-Kopien – einer oder mehrere Integrationsorte**
- **Verdopplung, Deletion, Inversion von Transgen-Sequenzen**
- **Komplexe Struktur der Einbauorte (Transgen-DNA gemischt mit pflanzl. DNA)**
- **Einbau überflüssiger DNA (Plasmide, T-DNA, Antibiotika-Resistenzgene)**
- **Einbau chromosomaler DNA (>18 kb) aus *Agrobacterium tumefaciens* (zu 0,4 % bei *Arabidopsis thaliana*)**
- **Unerwartete Aktivität der Promotoren (Gewebe, Entwicklungsstadium, Art)**



Gentransfer - Auskreuzung

- **Übertragung der Transgene auf Pflanzen der gleichen Art sowie auf verwandte Kultur- und Wildpflanzen**
- **Pollentransfer durch Wind und Insekten über große Entfernungen möglich**
- **Heimische Kulturpflanzen besitzen Kreuzungspartner unter Wildpflanzen (z.B. Raps, Zuckerrübe, Gräser/Getreide, Obstarten, Gehölze)**
- **(Ungewollte) Kombination von Transgenen in Kultur- und Wildarten (z. B. Dreifach-Herbizid-Resistenz bei Raps in Kanada)**
- **Gentechnische Kontamination von Landsorten und genetischen Ressourcen**
- **Unbekannte Effekte bei Transgen-Eintrag in anderen genetischen Hintergrund**
- **Wildpflanzen mit Transgenen/neuen Eigenschaften → Neue Wechselwirkungen**



Raps

- **Selbst- und Fremdbefruchtung**
- **zahlreiche Kreuzungspartner: z. B. Kohl, Rüben, Rutenkohl, Hederich,**
- **Pollenverbreitung durch Wind und Insekten**
- **Bienen-Flugradius >3 km, beflogene Fläche eines Volkes ~30 km²**
- **Auskreuzung über >2,5 km (bis 26 km für männlich sterile Pfl. gezeigt)**
- **Hoher Samenausfall bei der Ernte (3 – 6 %, höher als Aussaat)**
- **Durchwuchs 10 – 15 Jahre möglich (10 a nach Freisetzung von HR-Raps waren 40 % der Durchwuchspflanzen resistent)**
- **Ruderalpflanzen an vielen Standorten (z. B. Verkehrswege)**
- **Überlappende Blühzeiten mit verwandten Kreuzblütlern**





„Biologisches Containment?“

Transformation von Chloroplasten:

- Chloroplasten auch im Pollen –z.B. Koniferen, andere Arten, unter Stress
- Gentransfer in Kerngenom möglich
- Sehr hohe Zahl von Transgenkopien
- horizontaler Gentransfer erhöht aufgrund bakteriellen Systems?

Pollen- und/oder Samensterilität:

- auf Dauer zu sichern?
- Effekte auf Pollinatoren, zahlreiche Tierarten
- Gefährdung der Biodiversität

Genetic Use Restriction Technologies – GURTs/ Terminator-Technologie:

- komplexe Systeme, Wirksamkeit nicht dauerhaft gesichert
- kein sicheres Induktionssystem
- Toxizität der Rekombinase?

Ausbreitung von GVO

begünstigt durch Fitness-erhöhende Eigenschaften?

Besonders kritische transgene Eigenschaften:

- Resistenz gegen Schädlinge, Krankheitserreger oder Umweltstress
- verändertes Fortpflanzungs- oder Wachstumsverhalten

Kritische Arteigenschaften:

- anpassungsfähig, mehrjährig, Pflanzen/Samen winterhart, starke Samenproduktion, Samenverbreitung durch Vögel, Wind und Wasser über große Distanzen, jahrelange Keimfähigkeit der Samen, vegetative Vermehrung

Verbreitung:

- Tiere, Wind, Wasser, Erde sowie menschliche Aktivitäten (4 Ts - Trade, Transport, Travel and Tourism)

Erfahrung mit invasiven Arten:

- Charakteristika des aufnehmenden Ökosystems wichtig
- u. U. erhebliche zeitliche Verzögerung bis Ausbreitungsbeginn (bei Gehölzen bis zu Jahrzehnten/Jahrhunderten)
- Sichere Prognose nicht möglich

Direkte und indirekte Effekte auf Ökosysteme

- **Auftreten unerwünschter Eigenschaften als Folge von Positionseffekten (1) und pleiotropen Effekten (2)**
- **Effekte auf andere Organismen durch erwünschte (z.B. Bt-Toxine) und unerwartete Eigenschaften (z. B. Pilztoleranz bei GV-Petunien, erhöhter Ligningehalt bei Bt-Mais, verfrühtes Blühen bei transgenen Bäumen)**
- **Zahlreiche Expositionspfade möglich: z.B. Pollen, Samen/Früchte, Blatt- und Wurzelmaterial**
- **Boden als „Black Box“**
- **Neue Toxine/Inhaltsstoffe, Resistenzen und verändertes Wachstum besonders problematisch**
- **Vervielfältigte, evtl. synergistische Wirkungen bei Transgenkombinationen**
- **Neuer Trend: Kombination von Eigenschaften (stacked traits), z.B. Herbizid- plus Insektenresistenz**

(1) durch Einbauorte der Transgene bedingte Effekte, (2) Nebenwirkungen von Transgenen und Genprodukten

Herbizidresistente (HR)-Pflanzen

Glyphosat/Roundup

- behindert Mikronährstoff-Aufnahme (z.B. Mangan) → negative Effekte auf Ertrag und Krankheitsabwehr
- ist toxisch für Mikroorganismen (Zielenzym* von Glyphosat in Bakterien vorhanden) z.B. *Bradyrhizobium japonicum* → N-Düngung bei RR-Sojabohne?
- beeinflusst Bodenleben – Begünstigung pathogener Pilze wie Fusarien?
- ist toxisch für Amphibien, Wasserorganismen
- Herbizidresistenz bei Beikräutern (15 Beikräuter bereits Glyphosat-resistent)
- Veränderung der Artenzusammensetzung der Beikrautflora
- Signifikante Erhöhung des Herbizidverbrauchs: 19fach höherer Glyphosat-Einsatz bei Sojabohnen im Zeitraum 1994 – 2006 (USA), >50fach höher in Argentinien
- USA: Einsatz von Tankmischungen bzw. Altherbiziden (z. B. Paraquat, 2,4-D)
- HR-Pflanzen mit Mehrfachresistenz? Neben Glyphosat auch Resistenz gegen Glufosinat, Dicamba, ALS-Inhibitoren?

* 5-Enolpyruvyl-Shikimat-3-Phosphat-Synthase (EPSPS)

Herbizidresistente (HR)-Pflanzen

Wirkungen auf die Biodiversität

FSE*: HR-Raps, HR-Zuckerrübe, HR-Mais →

- **Reduktion der Wildpflanzen und ihrer Samenbank**
- **Reduktion der von Wildpflanzen lebenden Invertebraten**
- **HR-Rapsfeldränder: 44 % weniger Blütenpflanzen, -24 % Schmetterlinge**
- **HR-Zuckerrüben: Signifikant weniger Bienen und Wanzen**
- **Negative Effekte auf Nahrungskette, etwa Vögel, Kleinsäuger**

Spraydrift gelangt auf Nachbarflächen

Aber: in Anbauländern von HR-Pflanzen kein regionales Monitoring

- **D: 21 Beikraut-Schmetterlings-Associat. zum Monitoring empfohlen**
- *** FSE: Farm Scale Evaluations in UK**



Insektenresistenter Bt-Mais I

- **Bildung des Bt-Toxins während gesamter Vegetationsperiode in allen Pfl.-Teilen**
- **Bt-Wirkungsweise nicht völlig geklärt**
- **Diverse Expositionspfade: Pollen, Pflanzenmaterial, Bt-Toxin-haltige Beute, an Bodenpartikel gebundene Bt-Toxine**

Gefährdung von Nichtzielorganismen:

- **Schmetterlinge durch Aufnahme von Pollen auf Futterpflanzen – Pfauenaug, Schwalbenschwanz (sehr sensitiv)**
- **Nützlinge – über Beutetiere oder Aufnahme von Pollen/Blättern, z.B. Marienkäfer, Wanzen, Florfliegen, Parasitoide**

Effekte: Erhöhte Sterblichkeit, verzögerte Entwicklung, geringes Gewicht

- **Junge Larven besonders empfindlich**

Bienen: Wechselwirkung zwischen Parasitenbefall und Bt-Toxin?



Insektenresistenter Bt-Mais II

- **Eintrag von Bt-Toxin in Böden + Gewässer über Pflanzenmaterial (Wurzelexudate, Pollen, Pflanzenreste etc.)**
- **Anreicherung von Bt-Toxinen im Boden?**
- **In 1000 m Entfernung im Mittel 28.000 Maispollen/m², Spitzenwerte liegen deutlich darüber**
- **Effekte auf Bodenorganismen - Mikroflora, Regenwürmer, Insektenlarven, Nematoden etc?**
- **Effekte auf Wasserorganismen - Köcherfliegenlarven, Daphnien?**

Nachweis des cry1Ab-Gens (Mais) in Wasser/Sediment >21/40 Tage, in Muscheln

Resistenzentwicklung bei Schädlingen - 2008 beschrieben für Bt-Baumwolle

- **Resistenzmanagement mittels Hochdosis-Refugien-Strategie?**
- **Verringerung des Insektizideinsatzes?**

Bt-Pflanzen mit Kreuzungspartnern unter Wildpflanzen:

- **Kreuzungsnachkommen mit erhöhter Fitness (z.B. Sonnenblumen)**
- **Toxische Effekte auf unbekannte Zahl von Nichtziel-Organismen**



Schutz ökologisch sensibler Gebiete

Enge Verzahnung von Schutzgebieten und Agrarflächen in D + EU

Erhalt von Gebieten, die von GVO-Einwirkungen freibleiben, unerlässlich

- **aufgrund der Schutzwürdigkeit dieser Gebiete**
- **aus evolutionsbiologischen Gründen**
- **zwecks künftiger Züchtungsprogramme**
- **als Referenzflächen (baseline) für das Monitoring von GVO-Wirkungen**

Keine Mindestabstände zu Schutzgebieten im GenTG festgelegt

Brandenburg: 800 m Mindestabstand zwischen Bt-Mais und Schutzgebieten

Mögliche GVO-Einwirkungen

- **Einkreuzung von Transgenen**
- **Eintrag von Toxinen**
- **Ausbreitung konkurrenzfähiger transgener Pflanzen**
- **Eintrag von Breitbandherbiziden**
- **verringerte Bestäubungsleistung bei „Flucht der Imker“ (z.B. MON810 Mais)**
- **Intensivierung der Bewirtschaftung**



Effekte transgener Bäume

Transformation von Bäumen ist besonders umstritten, denn Bäume

- leben über Jahrzehnte, wenn nicht Jahrhunderte
- sind wenig domestiziert und daher durchsetzungsfähig
- besitzen Kreuzungspartner in der Natur
- sind zumeist Fremdbefruchter
- produzieren riesige Mengen an Pollen und Samen
- verbreiten Pollen und Samen über Kilometer, z.T. Hunderte von Kilometern
- Pollen-/Samentransport erfolgt durch Wind, Wasser, Tiere (z.B. Vögel)
- bilden Samen mit jahrelanger Lebensdauer
- zeigen teilweise vegetative Vermehrung

Gentransfer lässt sich nicht verhindern:

- **Transgene Eigenschaften** gelangen in Genpool von Baumarten in natürlichen und naturnahen Ökosystemen
- **Eigenschaften wirken auf zahlreiche Nichtzielorganismen** - über Jahrzehnte/Jahrhunderte
- **Wirkungen unter veränderten Umweltbedingungen** – Klimawandel?

Erzeugung steriler Bäume?

- **Bedingung: Sterilitätssysteme** über Jahrzehnte/Jahrhunderte funktionsfähig
- **Transgene werden jedoch häufig inaktiviert** – „transgene silencing“



Künftige Entwicklungen?

- **Neue Kombinationen von Pflanzenart und transgenen Eigenschaften**
- **Abschätzung von Umwelteffekten sehr schwierig – selbst bei „einfachen Eigenschaften“ wie Herbizidresistenz und Insektenresistenz fehlt wissenschaftlicher Konsens**
- **Transgen-Kombinationen mit additiver/synergistischer Wirkung?**
- **Ausweitung des GVO-Anbaus auf andere Regionen/Länder**
- **z. B. stressresistente transgene Pflanzen auf Grenzertrags- oder bislang nicht bewirtschafteten Standorten**

Mögliche Folgen:

- **Neue Kreuzungsmöglichkeiten mit Wildflora**
- **Neue Nicht-Zielorganismen betroffen**
- **Neuer Intensivierungsschub → erhöhter Biodiversitätsverlust**

Breite Diskussion weltweit, besonders über transgene Bäume

Auf COP 9 (Bonn 2008) Verweis auf Vorsorgeprinzip, jedoch kein Moratorium für Freisetzung/Anbau transgener Bäume vereinbart