

**Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement
Bundesamt für Strassenbau
Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)
Kommission 274 (Betrieb und Unterhalt)**

UNKRAUTBEKÄMPFUNG AN STRASSEN:

EVALUATION GEEIGNETER HERBIZIDE UND VERGLEICH CHEMISCHER, MECHANISCHER UND THERMISCHER METHODEN BEZÜGLICH WIRKUNG UND UMWELTRELEVANTER NEBENWIRKUNGEN

Ernst Aeschimann

Daniel Gut

1995

Schlussbericht des Forschungsauftrages 34/91

**Forschungsstelle:
Eidgenössische Forschungsanstalt für Obst-, Wein- und
Gartenbau
CH-8820 Wädenswil**

KURZFASSUNG

Mit dem Inkrafttreten der Stoffverordnung in der Schweiz 1986 wurde der Einsatz von Herbiziden im Strassenbereich stark eingeschränkt. Die vorläufig noch amtlich zugelassenen Herbizide sind zudem einer ständigen Reevaluation seitens der Bewilligungsbehörde unterworfen.

Der herbizidfreie Strassenunterhalt mit verschiedenen Methoden beginnt sich deshalb in der Praxis durchzusetzen. Allerdings sind bisher Erfolg und Auswirkungen der eingesetzten Verfahren zur direkten Unkrautregulierung an Strassen noch nicht vergleichend untersucht worden.

Mit der vorliegenden Arbeit wird versucht, die unterschiedlichen praktikablen Methoden zur Unkrautbekämpfung nach möglichst objektiv erfassbaren Kriterien zu vergleichen. Mit dem Anspruch auf Optimierung der Unkrautbekämpfung an Strassen wurden folgende Aspekte untersucht:

1. Evaluation möglichst umweltverträglicher Herbizide.
2. Vergleich nichtchemischer Methoden untereinander und mit Herbiziden bzgl. a) Wirkung auf unerwünschten Bewuchs, b) Kosten und Arbeitswirtschaft, c) ökologischer Auswirkungen.
3. Oekobilanzierung der verschiedenen Methoden.

In Bad Ragaz, Knoben und Wädenswil wurden entlang von Kantons- und Nationalstrassen Versuche angelegt zur Erfassung von biologischer Wirkung, Umweltauswirkungen, Kosten und Arbeitswirtschaft der Unkrautbekämpfung. Dabei wurden sieben chemische Produkte und je drei thermische und mechanische Geräte getestet. Zudem wurden ergänzende Untersuchungen im Labor zum Umweltverhalten der Herbizide durchgeführt.

Auswirkungen auf die Flora

Jedes Unkrautbekämpfungsverfahren veränderte die botanische Zusammensetzung im Vergleich zu weiterhin gemähten Bankettbereichen:

Systemische Blattherbizide und Abranden töteten allen Bewuchs ab. Neukeimung durch Samenunkräuter und einwachsende Pflanzen von unbehandelten Flächen her führten zu einer raschen Wiederbegrünung. Für einen ganzjährig offenen Boden sind mehrere Anwendungen nötig. Durch das Abranden mit einem Seilbesen wurde zusätzlich die Humusaufgabe abgetragen, was die Keimung von Samenunkräutern längere Zeit unterdrückte.

Die thermischen Verfahren reduzierten mit der gewählten Anzahl Behandlungen die Gesamt-Bodenbedeckung deutlich. Pflanzen ohne Regenerationsorgane wurden eliminiert, dafür vorwiegend ausläuferbildende selektioniert. Ein vollständiges Aushungern etablierter Pflanzen war während der drei Versuchsjahre nicht möglich.

Bodenherbizide verhinderten nach einer Elimination der vorhandenen Pflanzen mit Blattherbiziden für einige Zeit den Neuaufbau von Keimlingen (bei zwei der drei eingesetzten Bodenherbizide verzögerte sich bei den gewählten Dosierungen die Wiederbegrünung im Vergleich zur alleinigen Blattherbizidanwendung um ca. 2 Monate).

Erfolgreiche Strategien zur Bewuchsregulierung müssen aus Sicht der biologischen Wirksamkeit der einzelnen Bekämpfungsmethoden zukünftig vermehrt auf Kombinationen sinnvoller Massnahmen beruhen. Bei der Auswahl der Methoden spielen die vorhandene Ausgangslage (Pflanzenarten, Wachstumsstadien, Wuchsformen) und das angestrebte Ziel eine wesentliche Rolle.

Arbeitswirtschaft und Kostenvergleich

Der Herbizideinsatz war dank des geringeren Arbeitsaufwandes ökonomisch günstiger als die anderen untersuchten Symptombekämpfungs-Massnahmen mechanischer oder thermischer Art.

Thermische Verfahren wiesen durch den Propangasverbrauch und die relativ langsame Arbeitsgeschwindigkeit, verbunden mit der grossen Anzahl Behandlungen, einen hohen jährlichen Arbeits-, Energie- und Kostenaufwand auf.

Abranden war ebenfalls mit hohem Arbeits-, Material- und Energieaufwand verbunden, auch wenn dieser Aufwand auf mehrere Jahre verteilt werden konnte. Durch eine Kombination der mechanischen Unkrautbekämpfung in der Rinne mit der regelmässigen Strassenreinigung wären weitere Kosteneinsparungen möglich.

Das Mähen der Bankette kann auch aus wirtschaftlicher Sicht befürwortet werden, thermische und mechanische Methoden kosten ungefähr doppelt soviel.

Je grösser die Anzahl der beteiligten Personen und Fahrzeuge, desto höher war die potentielle Unfallgefahr. Bei den chemischen Methoden waren die Aufenthaltszeiten der Personen am Strassenrand im Vergleich zu den mechanischen resp. thermischen Verfahren nur ein fünftel resp. halb so lang.

Wie von der biologischen scheinen uns auch von der wirtschaftlichen Seite her Kombinationen verschiedener Methoden sinnvoll. Die Kosten müssen zwar aufgrund biologischer Daten neu beurteilt werden, sie dürften jedoch mittelfristig tiefer liegen als sie jetzt für thermische und mechanische Verfahren allein sind.

Oekologische Bewertung

Die Energiebilanz fiel deutlich zugunsten der chemischen Verfahren aus: Pro Kilometer behandelten Strassenrandes benötigten sie bei vergleichbarer Unkrautwirkung jährlich bis zu fünfmal weniger Energie als die physikalischen Methoden (direkter Energieverbrauch und graue Energie). Hauptursachen für den höheren Energieverbrauch der thermischen Verfahren waren der Propangasverbrauch und die grössere Anzahl Behandlungen.

Die Emissionen in Luft, Boden und Wasser wurden aufgrund der Energiebilanz errechnet. Das quantitativ am stärksten ins Gewicht fallende CO₂ war direkt abhängig vom Energieverbrauch. Auch bei weiteren Luftschadstoffen sowie den in Wasser gelösten anorganischen Stoffen waren die chemischen den physikalischen Methoden überlegen. Für die Produktion der Maschinen (graue Energie der Eisenherstellung) fielen bei den mechanischen Verfahren am meisten feste Abfälle im Boden an. Die Relevanz der im Boden vorübergehend verbleibenden Herbizid-Rückstände dürfte insbesondere bei Glyphosate nach heutigem Kenntnisstand im Ökosystem Strassenrand eher gering sein.

Die Oekobilanzierung der verschiedenen Verfahren war aus Gründen der Methodik sowie der Akzeptanz der zugrundeliegenden Kriterien und Grenzwerte problematisch. Die Entwicklung objektiver Methoden zur Beurteilung der Umweltauswirkungen ist noch im Fluss. Die eingesetzte Immissionsgrenzwert-Methode zeigte, dass die aggregierten Boden-, Luft-, und Wasserbelastung für die thermischen und mechanischen Methoden ungefähr gleich hoch waren; die chemischen Verfahren wiesen nach unseren Berechnungen nur eine halb so grosse Belastung auf.

Die Hauptfrage, ob der gesichert hohe Energieeinsatz physikalischer Methoden oder allfällige Herbizid-Nebenwirkungen aus ökologischer Sicht nachteiliger sind, müsste aufgrund der Oekobilanz zugunsten der chemischen Varianten beantwortet werden. Aus unserer Sicht scheint es deshalb aufgrund der hier erarbeiteten Resultate und unter den aktuellen Gegebenheiten eindeutig, dass eine gezielte Blattherbizid-Anwendung an Problemstellen neben wirtschaftlichen auch aus ökologischen Gründen sinnvoller sein kann als eine physikalische Methode mit einem entsprechend hohen Energieaufwand.

Schlussfolgerungen

Soll die Vegetation am Strassenrand optimal bekämpft oder in Richtung einer bestimmten botanischen Zusammensetzung gelenkt werden, so ist eine Kombination verschiedener Methoden am aussichtsreichsten. Eine mögliche Kombination zur Bekämpfung, unter Berücksichtigung des vorhandenen Pflanzenbewuchses, könnte folgendermassen aussehen:

- Humusansammlungen, welche als Grundlage für das Pflanzenwachstum dienen, mit einer mechanischen Grundreinigung ungefähr im Monat Mai entfernen.
- Wachsen anschliessend mehrjährige pfahlwurzel-, rhizom- oder ausläuferbildende Arten ein oder sind noch solche vorhanden, so können diese mit einem systemischen Blattherbizid nachhaltig beseitigt werden.
- Keimen darauf nur Pflanzen aus Samen, so sind thermische, mechanische oder chemische Nachbehandlungen im Jugendstadium geeignet, nach Möglichkeit kombiniert mit der Strassenreinigung.

Für die Bekämpfung des Pflanzenaufwuchses in der Wasserrinne gelten aus biologischer Sicht grundsätzlich dieselben Empfehlungen wie im Bankettbereich. Umwelt- und gerätetechnische Einschränkungen sind in dieser Übergangszone entscheidende Auswahlparameter für ein Verfahren.

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungen ist aus biologischen, ökonomischen und ökologischen Gründen ein gezielter Blattherbizideinsatz (insbesondere von Glyphosate) an Problemstellen den physikalischen Methoden mindestens ebenbürtig. Ein Verzicht auf diese Herbizide hätte gerade unter ökologischen Gesichtspunkten Nachteile. Blattherbizide können die Schwächen der physikalischen Methoden reduzieren. So sind nach einer chemischen Sanierung von physikalisch schwierig zu bekämpfenden mehrjährigen Unkräutern bedeutend weniger intensive physikalische Massnahmen notwendig, da neu auflaufender Bewuchs thermisch und mechanisch mit weniger Aufwand bekämpfbar ist.

Bodenherbizide sind an Strassen aus Sicht der Wirkung auf den Bewuchs wenig sinnvoll. Sie sollten nicht mehr eingesetzt werden, vor allem nicht in der wirklich problematischen Zone am Strassenrand, in der Wasserrinne. Dort ist die Gefahr einer Wasserkontamination wegen des langsamen Abbaus grösser als im Bankett.

Die vorliegenden Grundlagenkenntnisse sollten nun in der Praxis entsprechend umgesetzt werden können. Dazu benötigte Entscheidungshilfen und Führungsinstrumente sollten aufgrund des neuesten Kenntnisstandes neu erarbeitet oder ergänzt werden. Für die Beurteilung der aktuellen Methoden zur Unkrautbekämpfung resp. Bewuchsregulierung könnte die untenstehende Tabelle eine erste Entscheidungshilfe bieten.

Weiter ist von Entscheidungsträgern und durchführendem Personal entsprechende Schulung, Interesse und Engagement gefordert.

Zukünftige Untersuchungen müssen vermehrt auch vorbeugende Massnahmen einbeziehen. Politische und gesellschaftliche Auflagen, wie auch Diskussionen in Gewässer- und Umweltschutzkreisen, bilden in Zukunft wichtige Herausforderungen für den Strassenbau und -Unterhalt.

Entscheidungshilfe zur ökonomischen und ökologischen Beurteilung verschiedener Unkrautbekämpfungs-Massnahmen entsprechend ihrer biologischen Wirkung im Bankettbereich. Zusätzliche Aspekte der Sicherheit und möglicher Betriebsstörungen sind entsprechend dem Einsatzort (Mittelstreifen) ebenfalls zu berücksichtigen. Die ökologische und ökonomische Bewertung der Verfahren ist relativ zueinander. Aide à la décision pour lutter contre les mauvaises herbes sur les accotements sur un plan économique et écologique. Les aspects relatifs à la sécurité et aux perturbations éventuelles d'exploitation sont pris en considération. Les estimations économiques et écologiques sont relativement analogues.

Ausgangsvvegetation Probleme Problème de végétation	Ziel/Wirkung (ohne Bewertung) But/effets possibles (sans estimation)	mögliche Massnahmen mesures	ökonomisch économique	ökologisch écologiques	zu erwartende Probleme problèmes à attendre	Unfallgefahr/ Betriebsstörungen (Mittelstreifen) danger/perturbation
vorwiegend Samenunkräuter principalement plantes annuelles	kein Bewuchs pas de repousse	thermisch thermique	mittel moyen	mittel moyen	ausläuferbildende Pflanzen plantes stolonifères	gross/mittel grand/moyen
	kein Bewuchs	Seilbesen	mittel	mittel	ausläuferbildende Pflanzen, Samenunkräuter	mittel/gering
	pas de repousse	faucheuse	moyen	moyen	plantes stolonifères et annuelles	moyen/pau
	Humusabtrag, Einwachsen verhindern, kein Bewuchs enlever l'humus empêcher l'en- mencement pas de repousse	Abranden	schlecht	mittel	ausläuferbildende Pflanzen, Samenunkräuter	mittel/gering
	Bewuchs niederhalten, Barriere maintenir bas la repousse, barrière	abrasage	mauvais	moyen	plantes stolonifères et annuelles	moyen/pau
vorwiegend mehrjährige ausläufer- und pflanzwurzelbildende Arten principalement plantes vivaces stolonifères et à rhizome:	kein Bewuchs	mähen	mittel	mittel *	lückigen Bestand -> Problemunkräuter	--
	pas de repousse	tondre	moyen	moyen *	durée limitée -> mauvaises herbes	
	kein Bewuchs	herbisch, Blattherbizid	sehr gut	gut - **	Samenunkräuter	gering/gering
	pas de repousse	herbizide foliaire système	très bon	bon - **	plantes annuelles	peu/pau
	kein Bewuchs	chemisch, systemisches Blattherbizid	gut	mittel	Bodenerosion	mittel/mittel
Problempflanzen / Plantes à problème	kein Bewuchs	chemisch chimique	sehr gut	gut - **	plantes annuelles	gering/gering
	pas de repousse	mechanisch, manuell mécanique, manuel	très bon	bon	Wurzelsückstände	mittel/gering
	kein Bewuchs	chemisch chimique	moyen	gut	restes de racines	moyen/pau
	pas de repousse	chemisch chimique	sehr gut	gut - **	offene Stellen	gering/gering
	Wuchs unterdrücken, Samenbildung verhindern maintenir sous contrôle la croissance, empêcher la formation de graines	mähen tondre	très bon	bon - **	places ouvertes	peu/pau
Holzpflanzen plantes ligneuses	kein Bewuchs	Wuchs unterdrücken, Samenbildung verhindern maintenir sous contrôle la croissance, empêcher la formation de graines	mittel	mittel *	--	--
	pas de repousse	Wuchs unterdrücken, Samenbildung verhindern maintenir sous contrôle la croissance, empêcher la formation de graines	moyen	moyen *	--	--
	einzelne Distel chardons isolés	Wuchs unterdrücken, Samenbildung verhindern maintenir sous contrôle la croissance, empêcher la formation de graines	mittel	mittel *	--	--
	Disteln: mehr als 1 pro m ² chardons: plus de 1 par m ²	Wuchs unterdrücken, Samenbildung verhindern maintenir sous contrôle la croissance, empêcher la formation de graines	moyen	moyen *	--	--
	Wuchs unterdrücken, Samenbildung verhindern maintenir sous contrôle la croissance, empêcher la formation de graines	Wuchs unterdrücken, Samenbildung verhindern maintenir sous contrôle la croissance, empêcher la formation de graines	moyen	moyen *	--	--

* Persönliche Einschätzung, ohne Daten
wissenschaftliche Gesichtspunkte mit einbezogen, müsste die Bewertung möglicherweise angepasst werden.
** Auf Grund der in Kapitel "Ökologische Aspekte" erwähnten Auswirkungen als "gut" zu bewerten. Werden in Zukunft politische, gesellschaftliche und neue
wissenschaftliche Gesichtspunkte mit einbezogen, müsste die Bewertung möglicherweise angepasst werden.
* Estimation personnelle sans données
** selon les effets notés dans le chapitre "aspects écologiques", sont à considérés comme "bon". L'estimation devra se conformer à l'avenir aux nouveaux points de
vue politiques, sociaux et scientifiques qui se dessineront.

RESUME

L'utilisation d'herbicides le long des routes suisses a été fortement réduite depuis l'entrée en vigueur en 1986 de l'ordonnance sur les substances. Les herbicides qui sont encore utilisés sont soumis à une constante réévaluation par les autorités compétentes (groupe d'homologation).

D'autres méthodes commencent à être utilisées à la place des herbicides pour entretenir les routes. Jusqu'ici, le succès et les effets des méthodes utilisées n'ont pas été analysés dans une étude comparative. Par ce travail nous essayons de comparer à l'aide de critères objectifs les différentes méthodes pour lutter contre les plantes adventices. Avec le but d'optimiser la lutte contre les mauvaises herbes, les thèmes suivants sont étudiés:

- Evaluation des herbicides qui sont si possible supportables pour l'environnement
- Comparaison des méthodes non chimiques entre elles et avec herbicides: a) effet sur la croissance des plantes à combattre, b) coûts et organisation du travail, c) effets écologiques.
- Ecobilans des différentes méthodes.

Les essais ont été effectués à Bad Ragaz, Knonau et Wädenswil, le long des routes nationales et cantonales pour comprendre les conséquences biologiques, les effets sur l'environnement, les coûts et l'organisation du travail pour lutter contre les mauvaises herbes. Ainsi ont été comparés sept produits chimiques, trois appareils thermiques et également trois appareils mécaniques. En parallèle ont été entrepris des essais en laboratoire pour étudier le comportement des herbicides.

Effets sur la flore

Chaque méthode de lutte contre les mauvaises herbes modifie la composition botanique en comparaison avec les accotements où l'herbe a toujours été coupée:

Les herbicides systémiques et les désherbages (scarification) tuent toutes les pousses. Le sol est à nouveau rapidement recouvert par des graines et plantes provenant de surfaces non traitées. Pour garder un sol nu pendant une année, plusieurs applications sont nécessaires. Par désherbage à l'aide d'une brosse type métallique, il y a décapage de la couche d'humus, ce qui empêche la germination de graines de mauvaises herbes pour une plus longue période.

Les méthodes thermiques réduisent nettement la couverture du sol selon le nombre choisi de traitements. Les plantes sans organe de régénération sont éliminées, et pour cela, ce sont surtout les plantes à stolons qui sont sélectionnées. Une élimination totale des plantes établies n'a pas été possible durant les trois années de traitement.

Après l'élimination des plantes présentes à l'aide d'un herbicide systémique, l'emploi d'un herbicide racinaire empêche pour un certain temps la repousse de nouvelles plantes. (chez 2 des 3 herbicides racinaires la repousse a été retardée de 2 mois environ en comparaison avec l'application d'herbicides systémiques)

Les stratégies ayant permis de réguler les mauvaises herbes devront à l'avenir se baser, au vu des effets biologiques des méthodes individuelles, sur une combinaison de mesures plus adéquates. Des facteurs importants comme l'espèce végétale, le stade de végétation, les formes de croissance et le but à atteindre déterminent le choix de la méthode.

Organisation du travail et comparaison des coûts

L'utilisation d'herbicides est la plus économique des méthodes testées étant donné qu'elle ne nécessite pas beaucoup de travail.

Les méthodes thermiques demandent annuellement beaucoup de travail, d'énergie, et de coûts. De plus outre l'utilisation de gaz propane et la lenteur de travail il faut également tenir compte du grand nombre de traitements nécessaires.

La scarification nécessite également une grande quantité de matériel et d'énergie, bien que le travail puisse être réparti sur plusieurs années. En combinant l'intervention mécanique au niveau des rigoles et le nettoyage des routes, il est possible de réduire les coûts.

La tonte des banquettes peut être recommandée pour des raisons économiques, car les méthodes thermiques et mécaniques sont deux fois plus coûteuses.

Le danger potentiel d'accident est d'autant plus grand qu'il y a un grand nombre de personnes et de véhicules en action. Le recours à des méthodes chimiques permet de réduire les effectifs de personnel d'un cinquième par rapport aux méthodes mécaniques et thermiques.

Les combinaisons nous semblent une méthode judicieuse tant du point de vue biologique qu'économique. Les coûts doivent être réévalués en fonction des données biologiques. A moyen terme, ceux-ci devraient cependant être inférieurs aux coûts actuels des méthodes thermiques et mécaniques.

Valeur écologique

Le bilan énergétique penche nettement en faveur de la méthode chimique: la dépense d'énergie annuelle par km de routes traitées est jusqu'à 5 fois moins grande que pour les méthodes physiques. (utilisation directe d'énergie et énergie grise). La raison principale de cette importante consommation d'énergie dans les expériences thermiques est l'utilisation du gaz propane et le grand nombre de traitements.

Les émissions dans l'air, le sol et l'eau ont été calculées en fonction du bilan énergétique. Le CO₂ qui est le composant le plus important quantitativement dépend directement de la dépense d'énergie. Dans la recherche de substances nocives dans l'air et dans l'eau, les méthodes chimiques se sont montrées plus favorables que les physiques. Pour la production des machines (énergie grise de la fabrication du fer) ce sont les méthodes mécaniques qui produisent le plus de déchets dans le sol. Les résidus d'herbicides comme le Glyphosate sont restreints dans le sol d'après nos connaissances actuelles.

Le bilan écologique des différentes méthodes a été difficile à établir à cause de la méthodologie et de l'acceptation des critères et des valeurs limites. Le développement de méthodes objectives pour juger les effets sur l'environnement est en cours. La méthode malgré tout utilisée pour les valeurs limites d'immission montre que les charges dans le sol, l'air et l'eau pour les méthodes thermiques et mécaniques sont élevées dans les deux cas. D'après nos calculs, les méthodes chimiques présentaient une charge inférieure de 50%. Le problème consiste à faire le choix entre des méthodes physiques à grosse consommation d'énergie, et des méthodes chimiques avec les effets des herbicides d'un point de vue biologique. En fonction du bilan écologique, la balance penche en faveur des méthodes chimiques. En effet d'après nos résultats et les connaissances actuelles, il est prouvé qu'un herbicide ciblé est plus adéquat qu'un moyen physique qui demande une forte consommation d'énergie.

Conclusions

La solution consisterait à combiner plusieurs méthodes selon que la végétation doit être totalement éliminée ou que l'on souhaite une association végétale définie. Une combinaison possible pour lutter contre les mauvaises herbes peut se présenter ainsi:

- enlever la couche d'humus qui sert de base à la croissance des plantes avec une méthode mécanique au mois de mai.
- faire pousser ensuite des espèces vivaces telles que plantes à rhizome, racine pivotante ou stolonifères, qui peuvent ensuite être contrôlées par un herbicide foliaire systémique.
- ne faire pousser les plantes qu'à partir de graines car ainsi l'élimination pourra se faire au moyen de méthodes thermiques, mécaniques ou chimiques et selon les possibilités, en combinaison avec le nettoyage de la route.

Pour la lutte des mauvaises herbes dans les rigoles d'écoulement les recommandations sont les mêmes que pour les accotements d'un point de vue biologique. Les restrictions techniques et environnementales dans cette zone de transition sont déterminants pour le choix d'une méthode.

Sur la base des recherches on peut conclure qu'un herbicide foliaire ciblé (glyphosate) est plus approprié qu'une méthode physique du point de vue biologique, économique et écologique. De renoncer à de tels herbicides aurait des désavantages du point de vue écologique. Les herbicides foliaires peuvent réduire les faiblesses des méthodes physiques. Après une lutte chimique contre des plantes difficiles à traiter physiquement, ces plantes sont plus facile à traiter après car la repousse est combattable thermiquement et mécaniquement plus facilement.

Les herbicides racinaires sont moins appropriés dans l'idée d'un effet sur la repousse. Ils ne devraient plus être utilisés et surtout plus dans les zones problématiques en bord de route et dans les rigoles d'écoulement. Car le danger d'une contamination de l'eau est plus grand que sur l'accotement.

Les connaissances de base devraient être appliquées dans la pratique conformément aux prescriptions. Les aides à la décision et les instruments devraient être renouvelés ou remplacés en fonction de ces nouvelles connaissances. Le tableau ci dessous constitue un premier support pour le choix de la méthode la mieux appropriée. Il faut ensuite que les organes de décision et le personnel suivent une formation adéquate et montrent un intérêt et un engagement.

A l'avenir, les recherches doivent comprendre plus de mesures préventives. Des défis importants pour la construction et l'entretien des routes se profilent à l'horizon, en fonction des charges politiques, sociales ainsi que des discussions dans les cercles de protection des eaux et de l'environnement.

Inhaltsverzeichnis

Teil 1	GRUNDLAGEN	1
1.	Einleitung.....	1
2.	Rahmenbedingungen	2
Teil 2	BIOLOGISCHE WIRKUNG	5
1.	Einleitung.....	5
2.	Material und Methoden	5
2.1	Übersicht	5
2.2	Standorte.....	5
2.2.1	Bad Ragaz	7
2.2.2	Wädenswil.....	9
2.2.3	Knoblauch.....	9
2.2.4	Gemeinsames aller drei Standorte	10
2.3	Versuchsanlage	10
2.4	Verfahren und Methoden	10
2.4.1	Chemische Verfahren	13
2.4.2	Thermische Verfahren	13
2.4.3	Mechanische Verfahren	15
2.5	Schätzung des Deckungsgrades der Pflanzenbestände	17
2.6	Keimungstests mit thermisch behandelten Samen.....	18
2.7	Statistische Auswertung	19
3.	Resultate und Diskussion	20
3.1.	Einleitung	20
3.2	Vegetationsveränderungen.....	20
3.2.1	Vegetation vor Versuchsbeginn	20
3.2.2	Vegetation nach drei Versuchsjahren	21
3.2.3	Problempflanzen	26
3.2.4	Schlussfolgerungen (Veränderungen der Flora).....	26
3.3	Bodenbedeckungsverlauf	27
3.3.1	Blattherbizide	27
3.3.2	Bodenherbizide	31
3.3.3	Thermische Verfahren	36
3.3.4	Mechanische Verfahren	38
3.4	Positive und negative Nebenwirkungen auf die Vegetation.....	43
3.4.1	Chemische Verfahren	43
3.4.2	Thermische Verfahren	43
3.4.3	Mechanische Verfahren	44
4.	Gesamtdiskussion zu biologischer Wirkung	44
5.	Zusammenfassung	45

Teil 3	TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE	47
1.	Einleitung	47
2.	Material und Methoden	47
3.	Resultate und Diskussion	47
3.1	Betriebliche Störungen	47
3.2	Vorsichtsmassnahmen und Sicherheit	48
3.3	Arbeitskräfte und Zeitaufwand	50
3.4	Material- und Energieaufwand	52
3.5	Leistung	52
3.6	Vergleich der Methoden	54
3.6.1	Kosten	54
3.6.2	Technische und betriebliche Aspekte	56
4.	Gesamtdiskussion der technischen und wirtschaftlichen Aspekte	57
5.	Zusammenfassung	60
Teil 4	OEKOLOGISCHE ASPEKTE	61
1.	Einleitung	61
2.	Material und Methoden	62
2.1	Mobilität der Herbizide (Dickschicht-Bodenchromatographie)	62
2.2	Mobilität von Glyphosate in Glaskolonnen mit Kiessand	62
2.3	Methodik zur Erstellung einer Ökobilanz	62
3.	Resultate	63
3.1	Umweltverhalten der Herbizide	63
3.1.1	Mobilität von Herbiziden (Dickschicht-Bodenchromatographie)	63
3.1.2	Mobilität von Glyphosate in Kolonnen mit Kiessand (Säulenversuche)	64
3.2	Energie	65
3.3	Stoffflüsse	67
3.4	Bewertung der Stoffflüsse	68
4.	Diskussion	70
4.1	Probleme der Ökobilanzierung	70
4.2	Energieverbrauch	71
4.3	Luftbelastung	72
4.4	Boden- und Wasserbelastung	72
4.5	Nebenwirkungen auf Fauna und Flora	74
4.6	Schlussfolgerung	75
5.	Zusammenfassung	75
Teil 5	SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DIE PRAXIS	77
1.	Allgemeines	77
2.	Herbizide	78
3.	Mechanische Methoden	79
4.	Thermische Methoden	81
Teil 6	AUSBLICK	83

GLOSSAR	87
DANK.....	91
LITERATURVERZEICHNIS	93
ANHANG	99
A. Pflanzenliste	
B. Arbeits-, Material- und Energieaufwand der verschiedenen Geräte und Fahrzeuge, inkl. Kostenberechnungen der Verfahren	
C. Mobilität von Glyphosate in Glaskolonnen mit Kiessand	

Teil 1 GRUNDLAGEN

1. Einleitung

Seit 1986 gilt die neue Stoffverordnung (StoV) (Bundeskanzlei 1986), welche für alle nichtlandwirtschaftlich eingesetzten Pestizide eine separate Bewilligung vorschreibt und den Einsatz von Herbiziden und Pflanzenregulatoren im Strassenbereich weitgehend verbietet. Das Verbot gilt an öffentlichen oder mit Subventionen des Bundes errichteten privaten Strassen, Wegen und Plätzen. Ausgenommen sind National- und Kantonsstrassen; hier liegt der Entscheid bei den Kantonen. Vorbeugender Einsatz, Applikationen auf Hartbeläge oder im Fassungsbereich von Grundwasserschutzzonen (Zone S1) sind aber überall verboten. (StoV, Anhang 4.3 Art. 3, Absatz 5). Ebenfalls verboten ist der Einsatz auf Dächern, Terrassen und Lagerplätzen.

Für die chemische Unkrautbekämpfung an Strassen stehen momentan noch drei bewilligte Wirkstoffe zur Verfügung (FAW 1994). Die Industrie hat bis heute mangels Interesse keine neuen Bewilligungen für dieses Einsatzgebiet beantragt. Mit dieser Beschränkung auf drei Wirkstoffe könnten mittelfristig Probleme entstehen.

Der herbizidfreie Strassenunterhalt beginnt sich in der Praxis mit einem grossen Spektrum möglicher Unkrautbekämpfungs-Methoden durchzusetzen. Eine Umfrage bei direktbetroffenen Kreisen zeigte aber, dass die einzelnen Verfahren sehr unterschiedlich beurteilt werden (Masé und Klein 1991).

Mit der vorliegenden Arbeit wird versucht, die unterschiedlichen praktikablen Methoden zur Unkrautbekämpfung nach möglichst objektiv erfassbaren Kriterien zu vergleichen, um so Grundlagen zu liefern für eine sachliche Diskussion. Es wurden nur Methoden zur direkten Bekämpfung von Unkräutern untersucht. Ursachenbekämpfung durch bauliche Massnahmen oder Fragen nach dem Zusammenhang zwischen Bauwerksschäden oder Verkehrssicherheit und Verunkrautung würden den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Alle Pflanzen, welche den Randabschluss über- oder unterwachsen können, haben ihren Ursprung im angrenzenden Bankettbereich. Neben der direkten Bekämpfung des Pflanzenaufwuchses in der Wasserrinne und am Randabschluss ist deshalb die Vegetationslenkung in der Bankettzone enorm wichtig. Darum wurden auch speziell die Vegetationsveränderungen im Bankettbereich in die Versuche integriert.

Mit dem Anspruch auf Optimierung der Unkrautbekämpfung an Strassen wurden folgende Fragestellungen untersucht:

1. Evaluation möglichst umweltverträglicher Herbizide: Auf den speziellen Bodenverhältnissen des Strassenbankettes wurden in einem dreijährigen Versuch geeignet scheinende chemische Unkrautbekämpfungsmittel auf biologische Wirkung und umweltrelevante Nebenwirkungen hin untersucht.

2. Vergleich nicht-chemischer Methoden untereinander und mit Herbiziden: Mechanische, thermische und chemische Unkrautbekämpfungs-Methoden wurden bezüglich biologischer Wirkung, Wirtschaftlichkeit (inkl. Anwenderfreundlichkeit) und Ökologie untersucht und verglichen.

3. Erstellen einer Ökobilanz zu den verschiedenen Methoden: Aus dem Energieverbrauch der einzelnen Methoden sowie den physikalischen und chemischen Grunddaten der für die verschiedenen Verfahren verwendeten Stoffe wurden Energie- und Stoffflüsse errechnet. Dadurch ergab sich eine rein ökologische Bewertung der Methoden.

Eine Gesamtbewertung aller relevanten Aspekte der untersuchten Methoden soll Schlussfolgerungen für den Anwender und Entscheidungshilfen für die Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis ermöglichen.

2. Rahmenbedingungen

Philosophie der Unkrautbekämpfung an Strassen

Neben der physikalischen und chemischen Verwitterung der oberen Schichten einer Strasse können Mikroorganismen und in zunehmendem Masse auch Pflanzen selbst zur Veränderung des Strassenbelages beitragen. Mit fortschreitender Durchwurzelung, stärkeren Haltewurzeln oder gar verdickten Speicherwurzeln können Pflanzen mechanische Schäden an Strassen verursachen.

Neben diesen direkten Schäden werden aus Gründen der Verkehrssicherheit keine Pflanzen toleriert. Wasserabfluss und freie Sicht sollen gewährleistet sein. Zu diesen Gründen für einen bewuchsfreien Strassenrand können je nach Standort noch ästhetische Gesichtspunkte hinzu kommen.

Gemäss Bericht von Masé (1991) und allgemeiner Praxis kann folgende Rangfolge der Unterhaltsmethoden erstellt werden:

1. Toleranz
2. Ursachenbekämpfung durch bauliche Massnahmen
3. Bekämpfung wirklicher Unkräuter

Müssen nun Unkräuter an Strassen bekämpft werden, so stehen verschiedene Methoden zur Auswahl:

- Mechanische Bekämpfung durch abranden (maschinell oder von Hand), wischen, jäten oder mähen.
- Chemische Bekämpfung mit Herbiziden, welche für Strassen zugelassen sind.
- Thermische Bekämpfung mittels heisser Luft, direkter Flamme, indirekter Strahlung oder einer Kombination verschiedener Verfahren.

Vorgabe bei Projektbeginn

Durch Abklärungen und Diskussionen mit Vertretern der Unterhaltsdienste kristallisierte sich die Meinung heraus, dass neben der befestigten Randzone das Bankett im Bereich von 5 - 10 cm mitbehandelt werden müsse (Klein 1984).

Aufgrund dieser Vorgabe wurden die Untersuchungen und Versuche geplant und durchgeführt.

Änderungen der Rahmenbedingungen im Laufe des Projektes

Als Folge der ersten Resultate und intensiver Diskussionen mit verschiedenen Unterhaltsdiensten wurden im Verlaufe des Projektes die Rahmenbedingungen für die Unkrautbekämpfung an Strassen grundlegend geändert. Wurden 1984 in der Praxis noch auf einem Streifen von 10 - 100 cm des Bankettes Herbizide verwendet, so verzichteten viele Unterhaltsdienste bereits vor dem Inkrafttreten der neuen Stoffverordnung (StoV) gänzlich auf Herbizide an Strassen. Es waren dies 45% der Gemeinden, zwei kantonale Werkhöfe und sechs Nationalstrassenwerkhöfe (Klein 1984). Neben diesem Trend zum totalen Herbizidverzicht (für Gemeinden seit 1986 gesetzlich erlassen, StoV) und der immer gezielteren Verwendung der Herbizide an Problemstellen war die Verschmälerung des zu behandelnden Streifens entscheidend für den Einsatz von Unkrautbekämpfungs-Methoden an Strassen. Für den Strassenrand werden in Zukunft nicht mehr Methoden benötigt, welche Arbeitsbreiten von 50 cm oder mehr ermöglichen und die unspezifisch alles abtöten, sondern gezielt einsetzbare Verfahren für Problemstellen und wirkliche Problempflanzen.

Diese veränderten Rahmenbedingungen und die Erkenntnisse aus dem vorliegenden Forschungsprojekt müssen in weitere Untersuchungen einfließen. Kombinierte Methoden und spezielle Verfahren zur Behandlung effektiver Problemstellen werden in Zukunft stärker zu berücksichtigen sein (vgl. auch Teil 5 und 6).

Teil 2 BIOLOGISCHE WIRKUNG

1. Einleitung

In Kapitel 2 "Material und Methoden" sind die verschiedenen Versuche an den drei Standorten genauer beschrieben. Die gezeigten Verfahren gelten auch für die folgenden Teile 3 bis 6. Zusätzlich sind im Anhang B weitere Grössen zur Beschreibung der Methoden aufgeführt. Die nachfolgenden Resultate stellen eine Auswahl der zahlreichen Vegetationsdaten dar. Vegetationsveränderungen, Problempflanzen und Bodenbedeckungsverlauf während der dreijährigen Versuchsphase werden aufgezeigt.

2. Material und Methoden

2.1 Übersicht

Tabelle 1: Zusammenfassung der durchgeführten Versuche, Erhebungen und Zielsetzungen.

Versuchstyp	Erhebungen	Ziel und Auswertung
1. Biologische Unkrautwirkung der Herbizide	- Vegetationsaufnahmen	- Wirkungsspektrum und Wirkungsgrad der untersuchten Herbizide
2. Methodenvergleich (Unkrautwirkung der chemischen, thermischen und mechanischen Verfahren)	- Vereinfachte Vegetationsaufnahmen - Klimadaten	- Biologische Wirkung und Problemunkräuter der Methoden erfassen (Änderung im Pflanzenbestand) - Umweltverhalten, Ökobilanz, Vergleich der Methoden
3. Teststrecken (Ökobilanz der chemischen, thermischen und mechanischen Verfahren)	- Energie-, Arbeits- und Materialaufwand	- Ökobilanz, Vergleich und Akzeptanz der chem., therm. und mech. Verfahren
4. Laborversuche zum Umweltverhalten Herbizide	- Mobilität und Persistenz	- Umweltverhalten und spezielle Bedeutung an Strassen

2.2 Standorte

Zwei Standorte mit klimatisch unterschiedlichen Bedingungen wurden ausgewählt. Lage, lokales Klima, Strassentyp und Boden waren zum Teil verschieden, so dass im folgenden die Standorte noch genauer charakterisiert werden. Ausgewählt wurde das Autobahnteilstück N13 von der Verzweigung N3/N13 bei Sargans bis zur Ausfahrt Bad Ragaz mit eher trockenen Verhältnissen und viel Wind, die Standorte Wädenswil (N3 Horgen - Thalwil) sowie Knonau (Autobahnende) mit eher feuchteren oder wechselfeuchten Bedingungen.

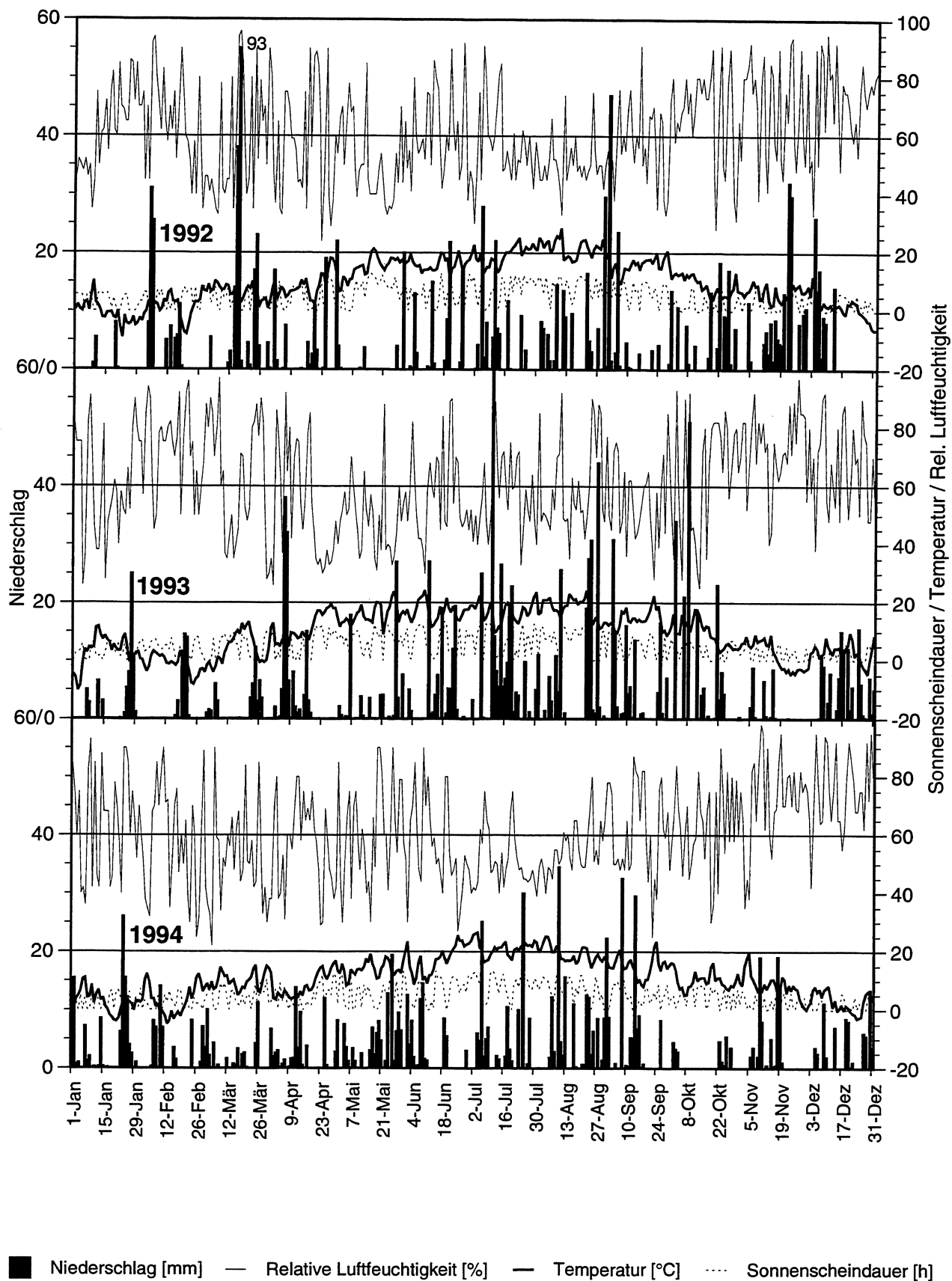


Abbildung 1: Durchschnittliche Tagestemperaturen, Niederschlagsmenge, relative Luftfeuchtigkeit und Sonnenscheindauer in Bad Ragaz von 1992 bis 1994.

2.2.1 Bad Ragaz

Der Standort ist vor allem durch starken Föhn geprägt. Trotz den Niederschlägen von ≈ 1400 mm pro Jahr waren deshalb die Wachstumsbedingungen eher trocken. Abbildung 1 zeigt den Temperaturverlauf, die Niederschlagsmengen, die Luftfeuchtigkeit und die Sonnenscheindauer von 1992 bis 1994. Der Sommer 1994 war sehr niederschlagsarm, was sich über alle Versuchsvarianten in einer starken Reduktion der Bodenbedeckung niederschlug. Neben Temperatur und Niederschlag waren im Gegensatz zu den anderen Standorten die Sonnenscheindauer und die Windverhältnisse für die Wirkung der verschiedenen Behandlungen mitentscheidend.

Der Versuch wurde an der Nationalstrasse N13 zwischen Kilometer 133.0 und 135.6 angelegt. Dabei waren die Versuchsabschnitte zur Bestimmung der biologischen Wirkung der Herbizide und der erste Block des Methodenvergleiches auf dem Bankett Richtung Chur, die restlichen Blöcke auf der gegenüberliegenden Fahrspur.

Richtung Chur war das Bankett mittels ca. 1 m langen und 0.15 m hohen Granitsteinen (Stellplatten) von der Fahrspur abgetrennt. Fahrstreifen, Standspur und Randabschluss wurden auf dieser Seite 1990 totalsaniert. Richtung Sargans wurde nur punktuell saniert. Der Übergang Asphalt - Bankett ist hier ohne Stellplatten, und die Entwässerung erfolgt über die Böschung (Abb. 2a und b).

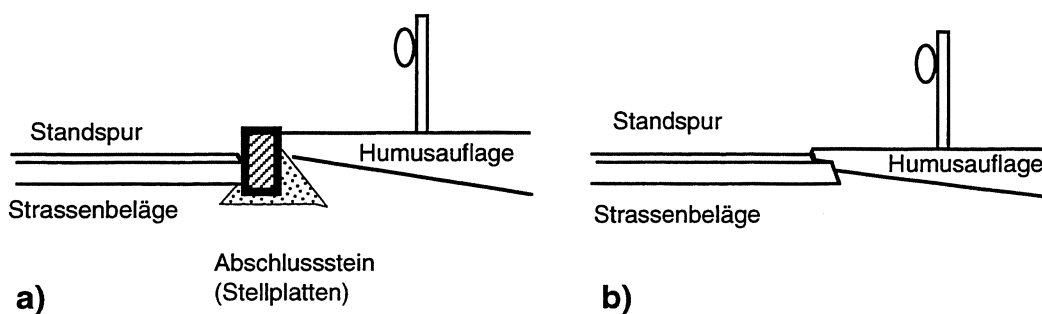


Abbildung 2: Verschiedene Randabschlüsse der N3/13 zwischen Sargans und Bad Ragaz: a) mit Stellplatten Fahrbahn Richtung Chur und b) ohne Stellplatten Fahrbahn Richtung Sargans.

Neben der Versuchsstrecke auf der Nationalstrasse wurden zusätzliche Wiederholungen der physikalischen Verfahren auf einem Teilstück der alten Kantonsstrasse Sargans - Bad Ragaz angelegt. Der bauliche Übergang Bankett - Asphalt war praktisch identisch mit jenem von Abbildung 2b. Von der Nationalstrasse unterscheidet sich die Strecke vor allem durch das intensiv genutzte Bankett. Entsprechend war die Nährstoffversorgung sehr gut und der Humusanteil recht hoch.

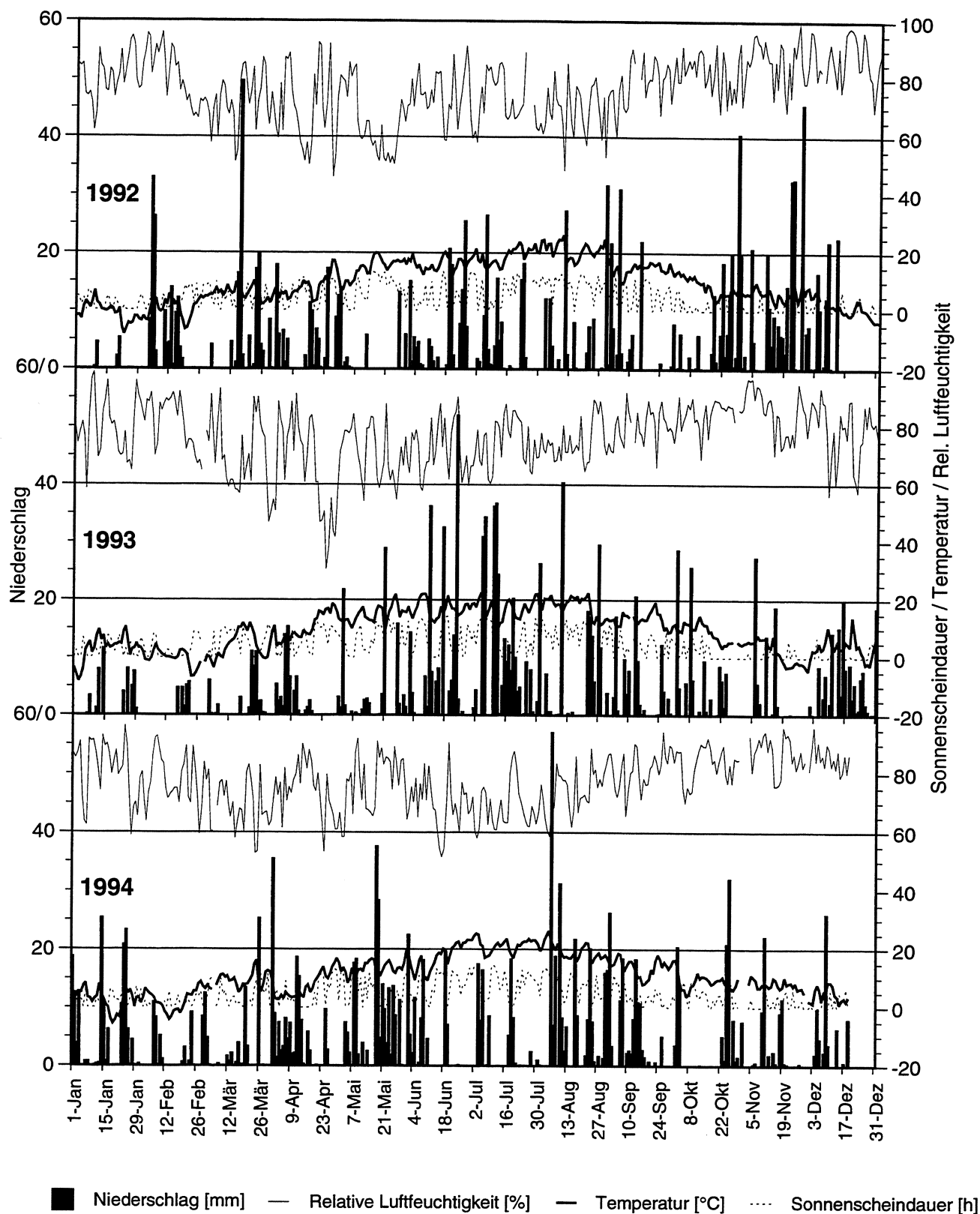


Abbildung 3: Durchschnittliche Tagestemperaturen, Niederschlagsmenge, relative Luftfeuchtigkeit und Sonnenscheindauer in Wädenswil von 1992 bis 1994.

2.2.2 Wädenswil

Die Versuchsfläche lag mehrheitlich in einem von Wald umgebenen Abschnitt entlang des nördlichen Zürichseeufers. Weite Strecken sind durch abfallende resp. steile Böschungen geprägt. Der Boden weist durch die Waldumgebung einen recht grossen organischen Horizont mit viel Streumaterial auf (O_L -Horizont: über 90 % unzersetztes org. Ausgangsmaterial), vor allem im Herbst lagen grössere Mengen von *Pinus*-Nadeln am Strassenrand.

Niederschläge fallen hauptsächlich im Sommerhalbjahr und mit einem langjährigen Durchschnitt von 1368 mm pro Jahr herrschen eher feuchte Bedingungen. Lokal können aber durch die steil abfallenden Böschungen wechselfeuchte oder wie an vielen Stellen unmittelbar am Strassenrand auch sehr trockene Bedingungen herrschen. Die Sonnenscheindauer ist durch den Wald und die Hecken entlang der Strasse stellenweise sehr kurz. Die Abbildung 3 gibt einen Überblick über das lokale Klima von Wädenswil während der dreijährigen Versuchsphase.

Die Versuchsstrecken wurden an der Nationalstrasse N3 zwischen Horgen und Thalwil von den Kilometern 112 bis 118 gewählt. Die Strecken des Methodenvergleiches und die 500 m langen Teststrecken zur Erhebung von technisch - wirtschaftlichen Grössen wurden an möglichst homogenen Abschnitten beider Fahrtrichtungen gewählt.

Die unterschiedlichen Randabschlüsse sind in Abbildung 4 dargestellt. Das Oberflächenwasser gelangt auf der ganzen Strecke in ein Entwässerungssystem.

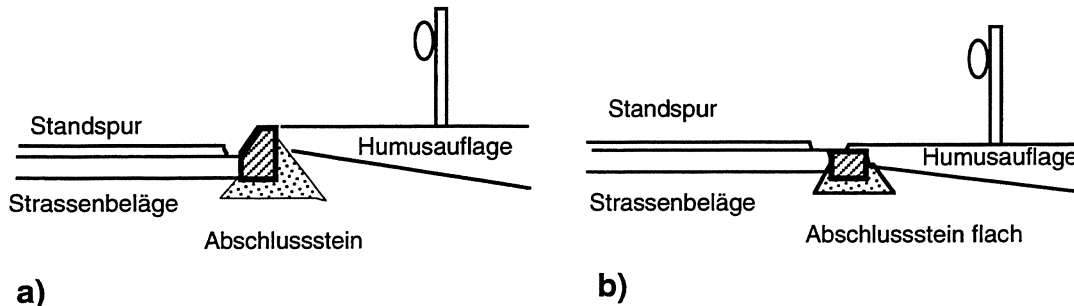


Abbildung 4: Verschiedene Randabschlüsse der N3 zwischen Horgen und Thalwil: a) Abschlussstein hoch; Deckbelag zurückversetzt oder bis zum Randstein. b) Abschlussstein flach; Deckbelag zurückversetzt oder auf gleichem Niveau wie Randstein

2.2.3 Knonau

Die Versuchsstrecke lag am Ende des noch nicht eröffneten Teilstückes der Autobahn N4 bei Knonau. Die Böschung wurde grösstenteils aufgeschüttet und nur entlang von ca. 200 m war eine Hochhecke (Teile von Block I) vorhanden. Da der Mittelstreifen gut zugänglich und die Vegetation dort vergleichbar mit jener der Bankette war, konnten auf allen Flächen Versuche angelegt werden.

Weil das unbenutzte Teilstück seit dem Bau im Jahre 1975 sehr reduziert unterhalten wurde, waren die Verhältnisse zum Teil sehr verschieden von jenen in Bad Ragaz und Wädenswil - vor allem bzgl. der Flora.

Die klimatischen Verhältnisse sind mit jenen von Wädenswil praktisch identisch. Durch die unterschiedliche lokale Lage hat der Standort aber mehr Sonne als Wädenswil.

2.2.4 Gemeinsames aller drei Standorte

Stellenweise herrschten an allen drei Standorten sehr trockene Bodenverhältnisse in den untersuchten 10 - 50 cm des unmittelbar an die Fahrbahn anschliessenden Bankettstreifen. Die jährlichen Niederschlagsmengen waren vergleichbar, durch unterschiedliche Sonneneinstrahlung und Windverhältnisse war der Boden aber ungleich feucht. Die ersten ca. 10 cm des Bankettes waren durch bauliche, pflegerische oder topographische Verhältnisse zum Teil sehr heterogen.

2.3 Versuchsanlage

Der Versuch wurde in vier Wiederholungsblöcken mit zufälliger Anordnung der Verfahren angelegt. Da die Versuche über drei Jahre auswertbar sein mussten, wurden alle Verfahren in vier zufällig angeordnete Unterverfahren aufgeteilt. Um die Wirkungsgrade der einzelnen Applikationen jedes Jahr zu berechnen, mussten vor der Behandlung vergleichbare Vegetationsbestände vorherrschen. Die meisten Behandlungen bewirkten aber eine Veränderung der botanischen Zusammensetzung auch in den folgenden Jahren. So wurde ein Aufsplitten der Verfahren nach jedem Jahr nötig.

2.4 Verfahren und Methoden

Für die Auswahl der folgenden Methoden und Verfahren wurden die Resultate der seit 1988 bei der SBB durchgeführten Versuche mitberücksichtigt (Müller 1993). Ebenfalls wurden praxisnahe, für schweizerische Verhältnisse geeignete Methoden in den Versuchen berücksichtigt.

Die untersuchten Herbizide mussten folgende Bedingungen erfüllen:

1. möglichst günstiges Umweltverhalten (vor allem geringe Auswaschgefahr)
2. gutes Verhältnis zwischen biologischer Wirksamkeit und Anzahl Applikationen
3. keine Selektion unerwünschter Flora

Ergänzende Untersuchungen zur Mobilität, Persistenz und ökotoxikologischen Eigenschaften wurden bei der Auswahl der beschriebenen chemischen Verfahren berücksichtigt. Es wurden grundsätzlich nur Stoffe eingesetzt, die diesbezüglich aufgrund des heutigen Stand des Wissens keine wesentlichen nachteiligen Nebenwirkungen aufweisen sollten. Zusätzliche Abklärungen mit diesen Stoffen dienten dazu, das Umweltverhalten spezifisch an Strassen zu überprüfen (Dickschicht-Bodenchromatographie und Säulenversuche, siehe Teil 4, "Ökologische Aspekte").

Die mechanischen und thermischen Methoden durften ein gewisses Mass an Arbeits- und Energieaufwand nicht überschreiten. Es konnten auch nur in der Schweiz erhältliche Geräte eingesetzt werden.

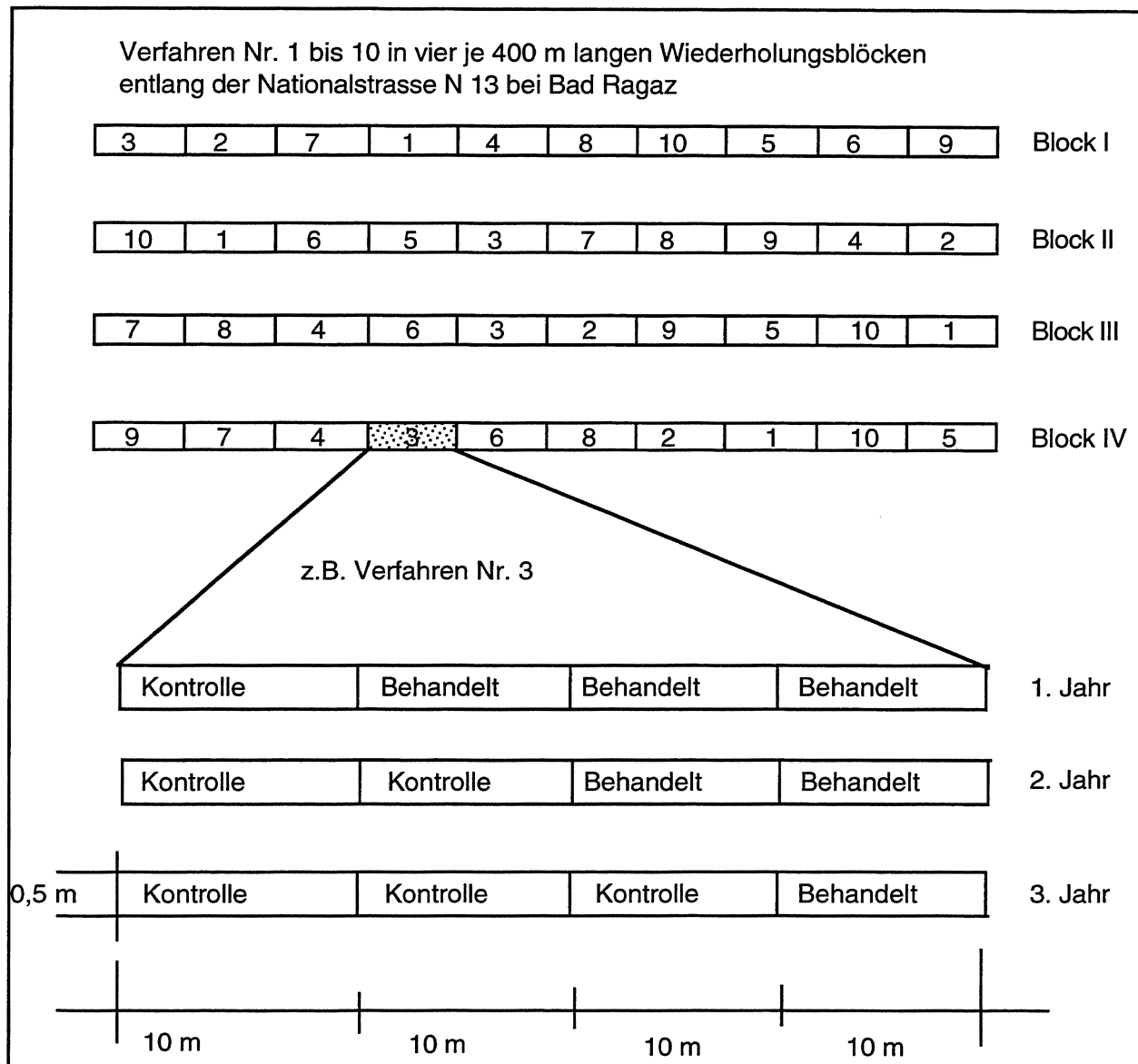


Abbildung 5: *Prinzipielle Anordnung der Versuche zur Erfassung der biologischen Unkrautwirkung der Herbizide und zum Methodenvergleich. Im Beispiel: Aufbau der zehn chemischen Verfahren in den vier Wiederholungsblöcken mit je vier Unterverfahren zur Erhebung der langfristigen botanischen Veränderungen und der Wirkungsgrade.*

Durchführung der Behandlungen

In der folgenden Tabelle 2 sind alle Behandlungen der Versuche an den drei Standorten zusammengefasst. Die jeweiligen Dosierungen der verwendeten chemischen Produkte ist ebenfalls aufgeführt. Alle Applikationen der Herbizide erfolgten mit einer mit Luftdruck betriebenen Rückenspritze und einem Spritzstock. Die verwendeten Düsen wurden der zu spritzenden Brühmenge angepasst.

Tabelle 2: Zeitpunkt der chemischen, thermischen und mechanischen Behandlungen an den drei Standorten Bad Ragaz, Wädenswil und Kronau. Daten der Vegetationsaufnahmen in den beiden Versuchstypen der biologischen Wirkung und des Methodenvergleichs. Beschreibung der Versuche und Verfahren vgl. auch Teil 2 (AS = Aktivsubstanz).

		1992										1993										1994													
Jahr	Monat	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Oktober	Nov.	April	Mai	Juni	Aug.	Sept.	Oktober	Nov.	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Oktober												
	Veg.Aufnahme No.	1		2	3	4		5		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17														
	Kronau	10.5.92		4.6.92		11.8.92		29.10.92		15.4.93	3.5.93	24.5.93	14.6.93	4.8.93	7.9.93		11.4.94	31.5.94		27.7.94															
	Wädenswil	30.4.92		1.6.92	11.7.92	14.8.92		13.10.92		14.4.93	3.5.93	24.5.93	14.6.93	17.8.93	6.9.93		5.4.94	31.5.94		26.7.94															
	Bad Ragaz (chem)	29.4.92		2.6.92	17.7.92	17.8.92		15.10.92		16.4.93	4.5.93		15.6.93	17.8.93	16.9.93		6.4.94	19.4.94	25.5.94		5.7.94	29.8.94													
	Bad Ragaz (meth)	29.4.92		2.6.92	28.6.92	17.8.92		15.10.92		16.4.93	4.5.93		15.6.93	17.8.93	16.9.93		6.4.94	19.4.94	25.5.94		5.7.94	29.8.94													
Biologische Wirkung																																			
	Kronau																																		
	Glyphosate		13.5.92			20.8.92					11.5.93				13.10.93			6.5.94																	
	Bodenherbizid			16.6.92						19.4.93			8.6.93					15.6.94																	
	Concert/Dichlobenil					20.8.92							8.6.93		13.10.93		14.4.94																		
	Foxtril-P/Basta												8.6.93																						
	Bad Ragaz																																		
	Glyphosate		13.5.92			19.8.92					17.5.93					2.11.93		5.5.94																	
	Bodenherbizid			9.6.92						19.4.93		7.6.93						8.6.94																	
	Concert/Dichlobenil					19.8.92						7.6.93					19.4.94																		
	Foxtril-P/Basta											7.6.93				2.11.93																			
Methodenvergleich																																			
	Wädenswil																																		
	Infraplusgerät				8.7.92	5.8.92	25.8.92				5.5.93	25.5.93	23.6.93	11.8.93	7.9.93	4.11.93	25.4.94																		
	Abflamngerät		22.6.92	15.7.92		29.7.92		4.11.92			5.5.93	26.5.93	22.6.93	18.8.93	7.9.93	7.11.93	25.4.94		13.6.94		9.8.94	6.9.94													
	Flachstahlbesen	28.4.92				31.7.92		20.10.92		26.4.93				16.8.93		3.11.93	18.4.94		13.6.94		9.8.94	6.9.94													
	Selbesen																																		
	Glyphosate		13.5.92				20.8.92				10.5.93						20.4.94		6.5.94																
	Bodenherbizide										11.5.93				13.10.93																				
	Foxtril-P/Basta			9.6.92						19.4.93		8.6.93			13.10.93				8.6.94																
	Bad Ragaz																																		
	Infraplusgerät				13.7.92	4.8.92	26.8.92				5.5.93	25.5.93	23.6.93	11.8.93	21.9.93	4.11.93	25.4.94		13.6.94		9.8.94	6.9.94													
	Abflamngerät		29.6.92	13.7.92		4.8.92		4.11.92			6.5.93	26.5.93	22.6.93	18.8.93	20.9.93	8.11.93	25.4.94		13.6.94		9.8.94	6.9.94													
	Flachstahlbesen		10.6.92						17.11.92	27.4.93							27.4.94																		
	Glyphosate		13.5.92				19.8.92				17.5.93					2.11.93		6.5.94																	
	Bodenherbizide												7.6.93																						
	Foxtril-P/Basta									19.4.93						2.11.93			8.6.94																
Wirkstoff																																			
	Aufnahme u. Wirkung	Firma	Produkt	Wirkstoff-Gehalt	1992										1993										1994										
	Glyphosat (Frühl.-Herbst)	Blattherbizid	Sandoz	31% ; 360g/l	8l/ha = 2.88 kg AS/ha (2%lg)											10kg/ha = 4.20 kg AS/ha (5%lg)										3kg/ha = 1.26 kg AS/ha (3%lg)									
	Glyphosat	Blattherbizid	Sandoz	42% ; 420g/kg												2.5 kg / ha = 1.05 kg AS/ha (0.5%lg)																			
	Glyphosat (Herbst)	Blattherbizid	Sandoz	42% ; 420g/kg												5l/ha = 1.00 kg AS/ha (1 %lg)										5l/ha = 1.00 kg AS/ha (1 %lg)									
	Glufosinat	Blattherbizid	Pflüss-Stauffer	18% ; 200g/l												7l/ha = 3.36 kg AS/ha (1.4 %lg)										7l/ha = 3.36 kg AS/ha (1.4 %lg)									
	Oryzalin	Bodenherbizid	Maag	48% ; 480g/l												7l/ha = 3.36 kg AS/ha (0.7 %lg)										5l/ha = 1.00 kg AS/ha (1 %lg)									
	Flurochloridion	Bodenherbizid	Sandoz	24.5% ; 250g/l												7 l/ha = 1.75 kg AS/ha (0.7 %lg)										7 l/ha = 1.75 kg AS/ha (0.7 %lg)									
	Proflufocarb	Bodenherbizid	Agroplant	78.9% ; 800g/l												11 l/ha = 8.80 kg AS/ha (1.1 %lg)										11 l/ha = 8.80 kg AS/ha (1.1 %lg)									
	Dichlobenil	Bodenherbizid	Renovita	7.50% ; 800g/l												20, 60, 120 kg / ha = 1.5, 4.5, 9 kg AS/ha										20, 60, 120 kg / ha = 1.5, 4.5, 9 kg AS/ha									
	Bifenox	Blatt-u.Bodenh.	Maag	23%												5l/ha (1 %lg)																			
	MCPP	Blattherbizid (Wuchsstoff)	Foxtril-P	20%																															
	Ioxynil	Blattherbizid		7.10%																															
	Metsulfuron-Methyl	Blatt-u.Bodenh.	Du Pont	6.82%	150g Concert / ha																														
	Thifensulfuron-Methyl	Blatt-u.Bodenh.		68.20%																															
	Oxyfluorfen	Blatt-u.Bodenh.	Maag	- ; 250g/l																						6 l/ha = 1.50 kg AS/ha (0.8 %lg)									
	MCPA	Blattherbizid (Wuchsstoff)	Pflüss-Stauffer	29% ; 330g/l																															
	2,4-D	Blattherbizid (Wuchsstoff)	Pflüss-Stauffer	40% ; 496g/l																						1.5 l / ha = 0.44 kg AS/ha (0.3 %lg)									
																										1.5 l / ha = 0.53 kg AS/ha (0.3 %lg)									

2.4.1 Chemische Verfahren

Tabelle 3: Übersicht der im Versuch "biologische Wirkung der Herbizide" eingesetzten Wirkstoffe mit den verschiedenen Applikationsterminen (fett gedruckt: im Text weiter verwendete Abkürzungen).

Verf. Nr.	Blattherbizid (Wirkstoff)	Bodenherbizid (Wirkstoff)	Bemerkungen
1	Glyphosate		Kontrolle zur Berechnung der Wirkung der Bodenherbizide, 1 mal pro Jahr im Frühjahr (Mai) Gly
2	Glyphosate Bifenox, MCPP und loxynil (Foxtril-P)		1992 und 1993 Frühjahrsbehandlung im Mai mit Gly, Herbst 1993 Fox gegen aufkommende Kräuter
3	Glyphosate MCPA, 2,4-D		Frühjahr und Herbst Gly-Behandlung (1993 mit MCPA und 2,4-D kombiniert, 1994 keine Behandlungen)
4	Glyphosate	Oxyfluorfen	Gly im Mai 1992 und 1993, Herbst 1993 Gly, MCPA und 2,4-D, 1994 Oxy im Juni
5	Glyphosate Glufosinat	Oryzalin	1992 und 1994 Gly im Mai und Oryz im Juni, 1993 Glu und Oryz zusammen im April und im Herbst nur Glu
6	Glyphosate Bifenox, MCPP und loxynil (Foxtril-P)	Oryzalin	1992-94 Gly im Mai und Oryz im Juni, 1993 zusätzlich im Herbst Fox
7	Glyphosate Glufosinat	Flurochloridon	1992 und 1994 Gly im Mai und Fluro im Juni, 1993 Glu und Fluro zusammen im April und im Herbst nur Glu
8	Glyphosate Bifenox, MCPP und loxynil (Foxtril-P)	Flurochloridon	1992-94 Gly im Mai und Fluro im Juni, Juni 1993 ein Unterverfahren mit Fox als Vergleich zu Fluro
9	Glyphosate Glufosinat	Prosulfocarb	1992-94 Gly im Mai und Pros im Juni
10	Metsulfuron- und Thifensulfuron-Methyl (Concert) Glyphosate	Dichlobenil	Aug. 1992 Concert (ohne Wirkung), 1993 Gly im Mai und im Juni verschiedene Dosierungen von Dichlo, April 1994 nur Dichlo wie im Juni 1993 (Dichlo als praxisrelevante Kontrolle eingesetzt)

Auf eine Auflistung chemischer, physikalischer und toxikologischer Eigenschaften wird an dieser Stelle verzichtet. Ausführliche Angaben zu den einzelnen Wirkstoffen finden sich bei Perkow (1992) und Domsch (1992). Für den Wirkstoff Glyphosate liegt eine umfangreiche Review vor (IPCS 1994).

2.4.2 Thermische Verfahren

Infrarotgerät (Tab. 4)

Das verwendete Gerät war ein Prototyp, die Weiterentwicklung eines früheren Strassenrandgerätes. Die Wärmeerzeugung erfolgte mittels Stabbrennern, die mit flüssigem Propangas gespiesen wurden. Die Wärme wurde über ein wellenförmiges Strahlungsgitter indirekt auf die Pflanzen reflektiert. Die Strassenrand-

anpassung konnte pneumatisch gesteuert werden. Die Brennerzündung erfolgte durch ein 12 V Stromaggregat. Das Gerät wurde an einen Unimog des Werkhofes angebaut.

Tabelle 4: Technische Angaben der Herstellerfirma des eingesetzten Infrarot-Strassenrandgerätes.

Zugfahrzeug	Unimog, Traktor, Kleinfahrzeug
Arbeitsgeschwindigkeit	2 - 5 km / Stunde
Arbeitsbreite	ca. 80 cm
Abmessungen	200 x 180 x 100 (L x B x H in cm)
Werkzeug/Energie	zwei 11 kg Propanflaschen
Arbeitsdruck	1,5 bar
Grundpreis (ohne Anbau)	ca. Fr. 10'000.–
Gewicht (inkl. Anbaurahmen)	ca. 400 kg
Gasverbrauch	ca. 10 kg / Stunde
Temperatur über Bodenoberfläche	ca. 500 - 600° C

Da es sich beim Gerät um einen Prototypen handelte, waren noch keine Firmenprospekte und Technische Blätter vorhanden. Die Angaben wurden vom deutschen und schweizerischen Wiederverkäufer gemacht.

Abflammgerät (Tab. 5)

Abflammgerät der Firma Terra Tech AG¹ in Oensingen. Das Strassenrandgerät STf - RG 3.1 wurde vor allem für den Kommunalbereich konstruiert, so ist es bei verschiedenen Strassenrandabschlüssen einsetzbar. Die Anpassung an die Bodenoberfläche erfolgt mit 12 V Elektromotoren. Die Wärme wird mittels drei Doppelbrennern (Propangas Flüssigentnahme) direkt auf den Boden geworfen. Das Gerät wurde an einen Unimog des Werkhofes angebaut.

Tabelle 5: Technische Daten des Strassenrandgerätes "STf - RG 3.1", Firmenangaben.

Zugfahrzeug	Unimog, Traktor, Kleinfahrzeug
Arbeitsgeschwindigkeit	2 - 4 km / Stunde
Arbeitsbreite	ca. 40 cm
Abmessungen	ca. 240 x 180 x 100 (L x B x H in cm)
Werkzeug/Energie	zwei 11 kg Propanflaschen
Arbeitsdruck	2 bar
Grundpreis (ohne Anbau)	ca. Fr. 16'000.–
Gewicht (inkl. Anbaurahmen)	ca. 250 kg
Gasverbrauch	ca. 15 kg / Stunde
Temperatur an Bodenoberfläche	ca. 500 - 700° C (Albrecht 1985)

¹ Terra Tech AG, Oltenstr. 43, CH-4702 Oensingen

Heissluftgerät (Tab. 6)

Das Gerät AFG 4 der Firma Borrmann Brenner Berlin² konnte nur in einem kleinen Testversuch geprüft werden. Gemäss neuerer Studien über die Wärmeübertragung Luft - Pflanze (Bertram und Meyer 1993) wurde mit diesem Gerät das Prinzip der grösseren Strömungsgeschwindigkeit der Luft umgesetzt. Mit einem benzinbetriebenen 2.5 kW Kompressor wurde die Geschwindigkeit der heissen Luft erhöht. Zur Zeit waren Heisslufthaube und Kompressor erst auf einem handgetriebenen Fahrgestell montiert. Die Anpassung an die Bodenoberfläche erfolgte manuell. 1995 soll das Gerät auch an ein Fahrzeug angebaut werden können.

Tabelle 6: Technische Daten des Heissluftgerätes "AFG 4" der Firma Borrmann Brenner Berlin.

Zugfahrzeug	handbetrieben
Arbeitsgeschwindigkeit	ca. 2 km / Stunde
Arbeitsbreiten	50 cm mit Haube, 11 cm offener Brenner
Abmessungen	170 x 65 x 98 (L x B x H in cm)
Werkzeug/Energie	zwei 11 kg Propanflaschen
Arbeitsdruck	1.5 bar
Grundpreis	ca. Fr. 16'000.-
Gewicht	ca. 60 kg
Gasverbrauch	ca. 3 kg / Stunde
Druckluft	1.5 - 2.5 bar, ca. 350 l / Min.
Temperatur an Bodenoberfläche	ca. 450 - 500° C

2.4.3 Mechanische Verfahren

Wildkrautbesen mit Seilbesen (Tab. 7)

Wildkrautbesen der Firma Wicki und Schacher AG³ in Retschenwil (HWH⁴, Dänemark). Der HWH - Geräteam Typ RH-2S oder RH-1S, bestückt mit einer 500, 700 oder 1100 mm Unkrautbürste, ist hydraulisch auf einen konstanten Bodendruck einstellbar. Es wurden Seilbesen der Firma A & B Bürstentechnik AG⁵ verwendet. Am besten wird dieser Geräteam in Kombination mit einer Strassenkehrmaschine verwendet. In den Versuchen wurde das Gerät in Wädenswil an einem Pony - Fahrzeug⁶ des Werkhofes Adliswil und in Bad Ragaz an einer Strassenkehrmaschine MFH 4000⁷ angebaut.

² Borrmann Brenner Berlin GmbH, Blücherstr. 22, D-10961 Berlin

³ Wicki und Schacher AG, Generalimport von HWH - Geräten, CH-6285 Retschwil/LU

⁴ HWH production a/s, Østergade 73, DK-9560 Hadsund, Dänemark, Herstellerfirma

⁵ A & B Bürstentechnik AG, CH-9620 Lichtensteig

⁶ Pony: Saugkehrmaschine der Firma Boschung, Maschinenfabrik, CH-3185 Schmitten/FR

⁷ MFH: Maschinenfabrik AG, CH-6280 Hochdorf

Tabelle 7: Technische Daten des Unkrautbesens "HWH" mit Gerätearmen Typ RH-2S oder RH-1S (Svensson 1991).

	Typ RH-1S Gerätearm	Typ RH-2S Gerätearm
Zugfahrzeug	Kleinfahrzeug, Traktor ab 15 PS	Kleinfahrzeug, Traktor ab 35 PS
Arbeitsgeschwindigkeit	2 - 4 km / Stunde	2 - 4 km / Stunde
Arbeitsbreite	5 - 20 cm (515 oder 715 mm Kehrdurchmesser)	5 - 20 cm (715 mm Kehrdurchmesser)
Abmessungen	ca. 150 x 140 x 100 (L x B x H in cm)	ca. 150 x 140 x 100 (L x B x H in cm)
Werkzeug/Energie	40 Seilstruppen, Ø 22 mm, Tellerdurchmesser 490 mm	80 Seilstruppen, Ø 22 mm, Tellerdurchmesser 690 mm
Arbeitsdruck	40 bar Bodendruck/Entlasten	80 bar Bodendruck/Entlasten
Grundpreis (ohne Anbau)	ca. Fr. 15'000.–	ca. Fr. 20'000.–
Gewicht (ohne Besen)	178 kg	275 kg
Abnützung des Besens	nach 50 - 150 Stunden	nach 50 - 150 Stunden
Schwenkbar	56° rechts und links	90 cm nach rechts u. links, Schnittscheibe WS - 2

Wildkrautbesen mit Flachstahl - Büschelbesen (Tab. 8)

Wildkrautbesen der Firma MFH, angebaut an einer Strassenkehrmaschine MFH 4200. Der verwendete Unkrautbesen war ein Büschelbesen mit Flachstahlborsten der Firma A & B Bürstentechnik AG.

Tabelle 8: Technische Daten des Unkrautbesens "Flachstahlbüschelbesen an MFH 4200".

Zugfahrzeug	Kleinfahrzeug, Traktor, Strassenkehrmaschine
Arbeitsgeschwindigkeit	ca. 0.5 - 3 km/h
Arbeitsbreite	Rinne (ca. 650 mm Kehrdurchmesser)
Abmessungen	ca. 100 x 80 x 70 (L x B x H in cm)
Werkzeug/Energie	60 Flachstahlbüschel, Ø 13 mm, Tellerdurchmesser 400 mm
Arbeitsdruck	Gerätegewicht entspricht Bodendruck
Grundpreis (ohne Anbau)	ca. Fr. 10'500.–
Gewicht (ohne Besen)	ca. 125 kg
Abnützung des Besens	nach 30 - 80 Stunden (ohne Druck bis 200 Stunden)
Schwenkbar	ca. 1 m nach rechts

Wasserhochdruck (Tab. 9)

Wasserhochdruck mit Diri - Jet Hochdruckpumpe der Firma Masson⁸ musste wegen Praxisuntauglichkeit für die vorgegebene Zielsetzung frühzeitig wieder aus dem Versuch gestrichen werden.

Wenn nach der Behandlung mit Wasserhochdruck keine bauliche Sanierung (z.B. Rinne ausgiessen) erfolgt, sind der enorme Arbeitsaufwand und der grosse Wasserverbrauch nicht gerechtfertigt. Die Wirkung ist momentan sehr gut, aber zu wenig dauerhaft. Die freien Rinnen wurden sehr schnell wieder von Pflanzen besiedelt, zudem war vorhandener Bewuchs wegen des tiefliegenden Vegetationspunktes schlecht bekämpfbar.

Erfahrungen des Werkhofes Wädenswil zeigten, dass mit dieser Methode in einem Arbeitstag (ca. 6 - 7h) rund 3000 m behandelt werden konnten (0.43 - 0.5 km/h).

Tabelle 9: Technische Daten der Hochdruckpumpe "Diri - Jet".

Zugfahrzeug	Kleinfahrzeug, Norm - Zapfwellen - Antrieb 1 3/8" oder 1 3/4" mit 540 resp. 1000 U/Min.
Arbeitsgeschwindigkeit	ca. 500 m pro Stunde (Rinnen)
Arbeitsbreite	Rinne
Abmessungen	ca. 40 x 35 x 30 (L x B x H in cm)
Werkzeug/Energie	Wasserdruck
Arbeitsdruck	0 - 200 bar (Wasserverbrauch max. 1080 l/h)
Grundpreis	ab ca. Fr. 3'500.-
Gewicht	ca. 15 kg

2.5 Schätzung des Deckungsgrades der Pflanzenbestände

Zur Beurteilung der biologischen Wirkung der Verfahren wurde die Bodenbedeckung der grünen Pflanzenmasse als Erfolgsgrösse verwendet. 100 % Gesamtbodenbedeckung bedeuten, dass die entsprechenden Anteile an Gräsern und Kräutern (Mono- und Dikotyledonen) den Boden vollständig bedecken. Zu Beginn und am Versuchsende wurden neben der Gesamtbodenbedeckung auch die Pflanzenarten bestimmt. In allen anderen Aufnahmen wurden nur Gesamtbodenbedeckung, Anteil Gräser und Kräuter und die 2 - 5 dominierenden Pflanzenarten erfasst.

Zur Abschätzung der benötigten Aufnahmefläche wurde das Minimumareal bestimmt, in welchem ca. 90 % der vorkommenden Arten enthalten sein sollten. Dies war für den Versuch der "biologischen Wirkung" eine Fläche von 10 mal 0.5 m und für den "Methodenvergleich" eine Fläche von 20 mal 0.25 m.

Durch wiederholte Aufnahmen der gleichen Flächen zu Beginn und am Ende der Bonituren wurde die Genauigkeit der Schätzungen der Bodenbedeckung überprüft. In den Bereichen von 0 - 25 und 75 - 100 % wurde eine gute Aufnahmegenauigkeit erzielt. Die Bereiche um 50 % waren etwas weniger genau. Die

⁸ Masson Komunaltechnik, Schaffhauserstrasse 5, CH-8503 Frauenfeld

Zusammenfassung der Anfangs- und Endaufnahme zur Beurteilung von Bestandesveränderungen wurde nach einer Umrechnung nach Braun-Blanquet (1964) dargestellt (siehe Anhang A).

2.6 Keimungstests mit thermisch behandelten Samen

Durch die thermische Unkrautbekämpfung soll die Keimfähigkeit von Unkrautsamen reduziert werden (Augustin 1990; Görgens 1992). Zur Überprüfung dieser Hypothese wurde folgender Versuch durchgeführt: Kurz nach der vierten Behandlung mit einem Abflamngerät wurden im September 1994 einige behandelte *Plantago major*- und *Mentha*-Pflanzen geschnitten und die Samen gewonnen. Als Vergleichspflanzen dienten unbehandelte Samen aus dem Bankett.

Im Labor wurden die Samen mit folgenden Verfahren zur Keimung gebracht:

Normalbehandlung

Je 100 Samen pro Pflanzenart ohne besondere Vorbehandlung auf Filterpapier in Petrischalen angesetzt.

Temperaturbedingungen im Klimaschrank:

08.00-18.00 Uhr 18°C

18.00-08.00 Uhr 12°C

Versuchsdauer: 1.11.1994 - 9.12.1994, total 38 Tage

Steril - Behandlung

Samen sterilisiert in Ethanol (70%). Für 2 - 5 Min. wurden 50 Samen jeder Pflanzenart in Ethanol eingelegt, anschliessend dreimal mit destilliertem Wasser gespült und unter sterilen Bedingungen auf Filterpapier in Petrischalen angesetzt. Alle Schalen wurden mit einem Paraffinstreifen verschlossen.

Temperaturbedingungen im Klimaschrank:

08.00-18.00 Uhr 18°C

18.00-08.00 Uhr 12°C

Versuchsdauer: 18.11.1994 - 9.12.1994, total 21 Tage

KNO₃-Behandlung

Die bei Zimmertemperatur gelagerten Samen wurden während vier Tagen bei 5° C im Kühlraum vernalisiert, anschliessend wurden 50 Samen jeder Art auf Filterpapier in Petrischalen angesetzt und mit 0.2% gesättigter KNO₃-Lösung begossen.

Temperaturbedingungen im Klimaschrank:

08.00-18.00 Uhr 30°C

18.00-08.00 Uhr 20°C

Versuchsdauer: 9.12.1994 - 29.12.1994, total 21 Tage

GA3-Behandlung

Die bei Zimmertemperatur gelagerten Samen wurden während vier Tagen bei 5 °C im Kühlraum vernalisiert, anschliessend wurden 50 Samen jeder Art auf ein mit Gibberellinsäure - Lösung gesättigtes Filterpapier gelegt. Mit einem gesättigten Filterpapier wurden die Samen bedeckt und über Nacht bei einer Temperatur von 20° C inkubiert. Anschliessend wurde gleich weiterbehandelt wie beim KNO₃-Verfahren.

Stammlösung: 100 mg GA3 / 100 ml H₂O (purum, Fluka, GK4; 10-fach konzentriert).

Gebrauchslösung: 0.1 ml der Stammlösung mit H₂O auf 100 ml auffüllen = 100 ppm

(mit einigen Tropfen NaOH lässt sich die Gibberellinsäure gut auflösen); pH auf ca. 5.8 eingestellt.

KNO₃ und GA3 Behandlung wurde gemäss der Empfehlungen der "International Seed Testing Association" durchgeführt (Theiler 1994).

“Quetsch” - Behandlung

Durch Quetschen wurden die Samenschalen zerstört und die Risse an der Oberfläche brachen die Keimruhe. Mit einem Mörser wurden 50 Samen pro Pflanzenart vorsichtig gequetscht und anschliessend auf einem mit Wasser gesättigten Filterpapier angesetzt.

2.7 Statistische Auswertung

Programme

Die statistischen Auswertungen wurden mit dem Statistikprogramm StatView für Macintosh (Version 4.02) durchgeführt.

3. Resultate und Diskussion

3.1. Einleitung

Da in diesem Kapitel eine enorme Menge an Vegetationsdaten zusammengefasst wird, folgt anschliessend eine kurze Übersicht über die Datendarstellung (Tab. 10): Nach der Analyse der Daten konnte aufgrund der Gemeinsamkeiten vier Verfahren als Blattherbizid-Varianten und sechs als Bodenherbizid-Varianten zusammengefasst werden. Da bei der biologischen Wirkung der zwei thermischen Verfahren keine Unterschiede festzustellen waren, wurden sie ebenfalls zusammen besprochen. Die mechanischen Verfahren werden separat erörtert, da wie dargestellt in Teil 2, Kapitel "Material und Methoden", zum Teil verschiedene Rahmenbedingungen herrschten.

Entsprechend der verschiedenen Standorte und der zwei Versuchstypen ergibt sich die Besprechungsmatrix von Tabelle 10.

Tabelle 10: Besprechungsmatrix der Verfahrensgruppen (1.-5) und Versuchstypen (A-C) an den verschiedenen Standorten (a-c). Verfahren und Orte mit gleichen Zahlen oder Buchstaben erlauben einen direkten Vergleich der Resultate. Zahlen und Buchstaben entsprechen den Überschriften im Text.

Versuche	Biologische Wirkung der Herbizide (A)		Methodenvergleich (B)		Rinnenversuch (C)
Verfahren / Ort	Knouau (a)	Bad Ragaz (b)		Wädenswil (c)	
unbehandelte Kontrollen (1.)	1 a	1 b		1 c	
Blattherbizide (2.)	A-2 a	A-2 b	B-2 b	B-2 c	C-2 c
Bodenherbizide (3.)	A-3 a	A-3 b	B-3 b	B-3 c	C-3 c
Therm. Verfahren (4.)	--	--	B-4 b	B-4 c	C-4 c
Mech. Verfahren (5.)	--	--	B-5 b	B-5 c	C-5 c

3.2 Vegetationsveränderungen

In Anhang A "Pflanzenliste" wird eine Zusammenfassung aller bestimmten Pflanzenarten und deren Veränderung während der dreijährigen Versuchsdauer wiedergegeben.

3.2.1 Vegetation vor Versuchsbeginn

a) Knouau

In Knouau wurde nur einmal im Herbst gemäht und das Pflanzenmaterial abgesaugt. Die geringe Schnitthäufigkeit führte zu einer eher lockeren Grasnarbe. Durch den Abtransport des ohnehin geringen Pflanzenmaterials blieb der Standort recht nährstoffarm. Teile des Blockes Nr. 1 waren leicht verschieden von den andern drei Blöcken, da diese unmittelbar an Waldflächen anschlossen. Der Standort war sehr

artenreich, es wurden über 70 Arten bestimmt. Gemäss Buser et al. (1988) werden Pflanzengesellschaften an Strassen mit mehr als 35% Bodenbedeckung, einer durchschnittlichen Höhe von weniger als 70 cm und einem Anteil von mehr als 10 % an *Bromus erectus* oder *Festuca ovina* als Magerwiese klassiert. Dies trifft für Knonau zu, der Bodenbedeckungsgrad war im Frühjahr 1992 zwischen 40 und 50 %, die vorherrschenden Arten waren *Bromus erectus*, *Bromus inermis*, *Festuca rubra* und *Festuca ovina*.

b) Bad Ragaz

In Bad Ragaz wurde das Bankett ca. dreimal pro Jahr gemulcht und das Pflanzenmaterial liegen gelassen, so lag eine recht nährstoffreiche Fettwiese vor mit Pflanzenarten des umliegenden Grünlandes. Der erste Schnitt im Bankett erfolgte bereits Ende Mai. Die Böschung wurde zweimal pro Jahr gemulcht. Da keine Nährstoffe entzogen wurden und zudem regelmässig Niederschläge fielen, waren die Wachstumsbedingungen gut. Im Frühjahr 1992 betrug die Bodenbedeckung ca. 60%. Vorherrschende Arten waren *Dactylis glomerata*, *Arrhenatherum elatius*, *Taraxacum officinale*, *Achillea millefolium* und *Daucus carota*.

c) Wädenswil

Das Bankett wurde ca. dreimal pro Jahr gemäht und das Schnittgut abgesaugt. Der erste Schnitt erfolgte Anfang Juni. Die Böschungen wurden zweimal jährlich gemäht. Die Wachstumsbedingungen waren durch das reichlich vorhandene Wasser optimal. Lokal gab es aber Abschnitte mit sehr wenig Sonnenschein (Waldrand) und Strecken mit trockenen Bedingungen (abfallende Böschungen mit geringer Humusaufgabe). Der Standort Wädenswil kann, wie Bad Ragaz, als Fettwiese charakterisiert werden (Buser et al. 1988). Unterschiede gibt es in der Topographie. So kommen stellenweise wegen dem reichlich vorhandenen Hangwasser Arten wie *Equisetum palustre* vor. Fehlt dieses Wasser und kann die Sonne trotz Waldstellen länger einwirken, so kommen auch *Sedum*-Arten vor. Streckenweise waren hohe Moosanteile zu beobachten.

3.2.2 Vegetation nach drei Versuchsjahren

1. Unbehandelte Kontrolle (Versuchstyp A-C, Standorte a-c, vgl. Tab. 10)

Die nur gemähten oder gemulchten Kontrollparzellen wiesen an allen Standorten bei Versuchsende noch ungefähr die gleiche Artenzusammensetzung auf wie zu Beginn der Versuche. Natürliche Schwankungen der totalen Bodenbedeckung während der dreijährigen Versuchsdauer wurden beobachtet (vgl. Kap. "3.3 Bodenbedeckungsverlauf").

Die Schnitthäufigkeit wirkte sich auf die Dichte der Grasnarbe aus. Wädenswil und Bad Ragaz mit je drei Schnitten hatten einen dichteren Bewuchs des Bankettes als Knonau mit nur einem Schnitt im Herbst. Zu Versuchsbeginn 1992 war der Gräseranteil am Gesamtbestand mit ca. 70 % an allen Standorten relativ hoch.

2. Blattherbizide (Versuchstyp A-C, Standorte a-c, vgl. Tab. 10)

Die behandelten Parzellen entwickelten sich in Abhängigkeit der Verfahren unterschiedlich. Durch die Glyphosate-Behandlung im Frühling 1992 wurden praktisch alle vorhandenen Pflanzenarten vernichtet. Die darauf neu keimenden Pflanzen waren in Bad Ragaz vor allem Ackerunkräuter wie *Sonchus*-, *Senecio*-, *Chenopodium*-, *Stellaria*- und *Matricaria*-Arten. In Wädenswil war offensichtlich der Samenvorrat an einjährigen Arten aufgrund der Umgebung (Böschung, Waldrand) etwas geringer. Aufkommende Arten waren vor allem *Taraxacum officinale*, *Potentilla reptans* und *Euphorbia* ssp. In Knonau war der Samenvorrat von *Setaria*-, *Digitaria*- und *Panicum*-Arten derart gross, dass sich von Juni bis August praktisch keine anderen Arten etablieren konnten.

Das Einwachsen von ausläuferbildenden Pflanzen nach einer Glyphosate-Applikation war an allen Standorten gering. Dabei spielte vor allem die botanische Zusammensetzung des angrenzenden Bankettes und die Schnitthäufigkeit eine wichtige Rolle. Waren wie in Bad Ragaz ein grosser Samenvorrat und im angrenzenden Bankett wenig ausläuferbildende Pflanzen vorhanden, so dominierten die Sommer- und Herbstkeimer.



Abbildung 6: Jährlich eine Blattherbizid-Anwendung im Mai (Glyphosate). links: Herbizidparzelle, rechts: unbehandelte Kontrollparzelle. Aufnahmedatum: Oktober 1994.

3. Bodenherbizide (Versuchstyp A-C, Standorte a-c, vgl. Tab. 10)

Die Bodenherbizide unterdrückten im Gegensatz zu den Blattherbiziden den Neuaufwurf von Pflanzen aus Samen je nach Applikation mehr oder weniger lang. Bei optimalem Einsatz konnte die Sommerkeimwelle unterdrückt werden (mehrheitlich Hirsen). Es entwickelten sich dagegen vor allem ganzjährig oder im Herbst keimende ein- und mehrjährige Arten. Wurde im Frühjahr erneut ein Bodenherbizid appliziert, so konnten sich die aufgelaufenen mehrjährigen Arten nicht etablieren, somit waren auf diesen Flächen längere Zeit geringe Bodenbedeckungsgrade anzutreffen (Abb. 7). Dafür gab es Parzellen mit grossem Anteil einwachsender Pflanzen wie *Glechoma hederaceum* oder *Convolvulus*-Arten (vgl. Anhang A). In Knonau war das Einwachsen von *Clematis*- und *Rubus*-Arten nicht nur auf Bodenherbizid-Abschnitte beschränkt. Letztere Arten sind jedoch auf regelmässig gepflegten Böschungen normalerweise nicht anzutreffen und bilden damit auch keine Gefahr für das Bankett. Die Böschungspflege spielt eine entscheidende Rolle bezüglich der potentiellen Verunkrautung des Bankettes (Müller 1993).

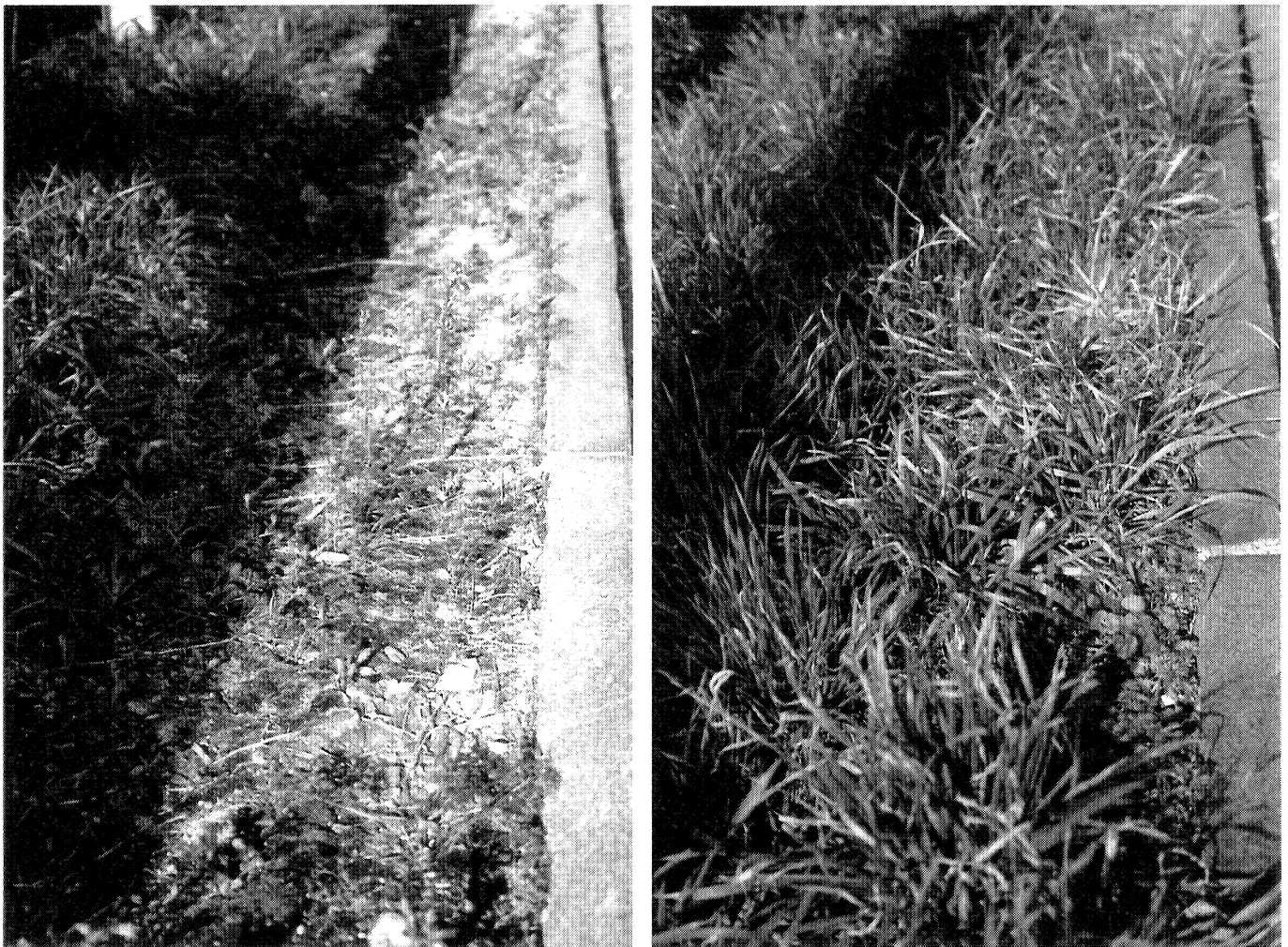


Abbildung 7: Jährlich eine Bodenherbizid-Anwendung im Juni (Oryzalin). links: Herbizidparzelle, rechts: unbehandelte Kontrollparzelle. Aufnahmedatum: Oktober 1994.

4. Thermische Verfahren (Versuchstyp B, C, Standorte b, c, vgl. Tab. 10)

Die thermische Behandlung förderte die Ausbreitung von Ausläuferpflanzen im Bankett aus dem angrenzenden unbehandelten Bankettbereich. In Bad Ragaz waren es hauptsächlich folgende Gräser: *Agropyron repens*, *Agrostis stolonifera* und *Poa pratensis*. Daneben waren immer auch noch Kräuter mit Ausläufern (z.B. *Glechoma hederaceum*) oder Pfahlwurzeln (*Taraxacum officinale*) zu beobachten. Diese Wuchsformen wurden einerseits von der thermischen Bekämpfung nur vorübergehend geschädigt und trieben rasch wieder aus. Andererseits waren sie besonders befähigt, freiwerdende Flächen schnell neu zu besiedeln. Einjährige Frühjahrs- und Sommerkeimer konnten sich neben den etablierten Ausläuferpflanzen dagegen nicht durchsetzen - dies im Gegensatz zur Behandlung mit Blattherbiziden, wo die gesamte behandelte Fläche mindestens kurzfristig offen war und sich Keimpflanzen ansiedeln konnten.

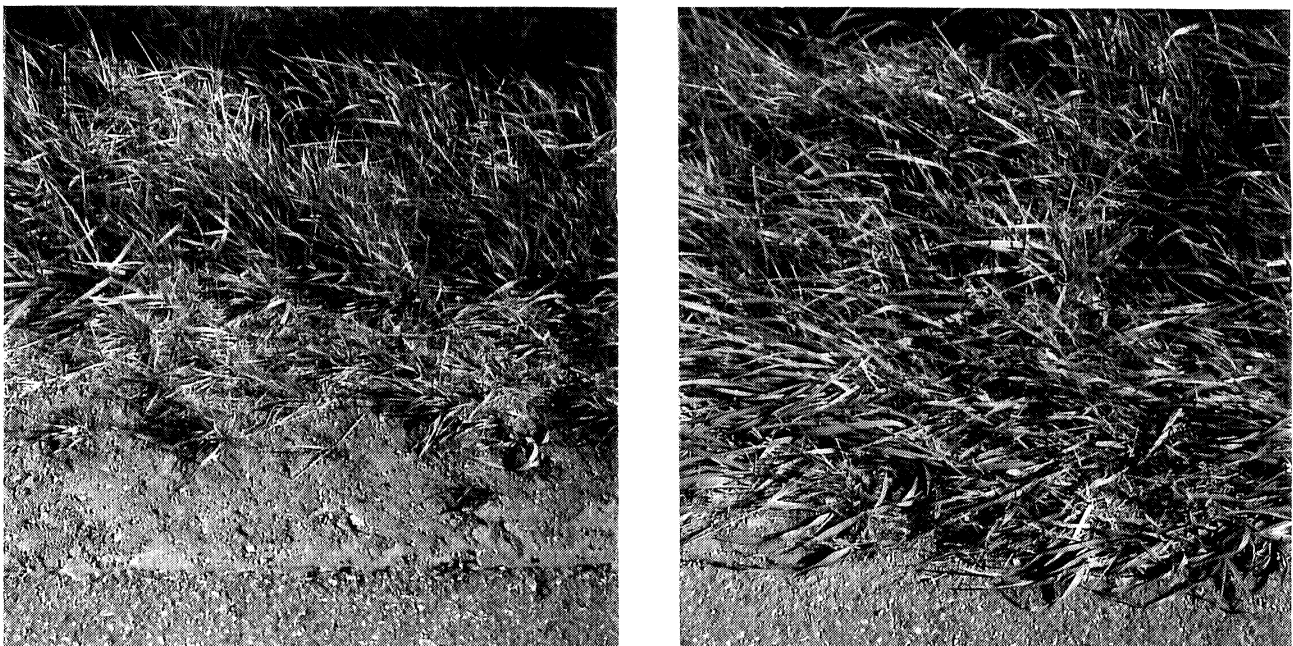


Abbildung 8: Vier bis sechs thermische Behandlungen pro Jahr. Links behandelt, rechts unbehandelte Kontrollparzelle. Aufnahmedatum: Oktober 1994.

5. Mechanische Verfahren (Versuchstyp B, C, Standorte b, c)

Die Parzellen, welche mit dem Seilbesen abgerandet wurden, waren je nach Strassenabschluss sehr unterschiedlich bewachsen. Die ersten 5 - 10 cm des Bankettes hatten oft eine geringe Humusschicht. Waren wie in Bad Ragaz keine Stellplatten als Standstreifenbegrenzung vorhanden, so konnte mit dem Seilbesen sehr sauber die gesamte Humusdecke bis auf die Kiesschicht oder den auslaufenden Asphaltbelag abgetragen werden. Bad Ragaz war praktisch unkrautfrei. Ein Unkrautdruck entstand wegen der fehlenden Humusschicht nur vom Bankett her. *Glechoma hederaceum* und *Convovulus*- Arten waren die häufigsten Pflanzen.



Abbildung 9: Jährlich eine mechanische Behandlung (Abranden mit Drahtseilbesen) im April des Strassenbankettes der N13 in Bad Ragaz. Links behandelt, rechts unbehandelte Kontrollparzelle. Aufnahmedatum Oktober 1994.

3.2.3 Problempflanzen

Als Problempflanzen werden Arten bezeichnet, die durch ihre Wuchsform mögliche Schäden am Bauwerk oder Störungen des normalen Betriebes verursachen können und die unter Umständen schwierig zu bekämpfen sind. Es handelt sich im wesentlichen um Pflanzen mit störenden Ausläufern oder sehr vitalem Wurzelwerk.

Problempflanzen, wie sie auf Banketten der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) vielerorts auftreten (Müller 1993), waren auf den Versuchsflächen entlang der Strassen nirgends in selbem Ausmass zu beobachten. Das Artenspektrum war aber das gleiche wie bei der SBB: *Equisetum*-, *Clematis*- und *Rubus*-Arten. In der Rinne war *Agropyron repens* zusätzlich ein Problem. In Knonau, bei nur einem Schnitt pro Jahr, wurde *Fraxinus excelsior* (Esche) problematisch. Die im Herbst auf den Stock gesetzten Gehölze schlugen im Frühjahr sehr rasch wieder aus. Zum Teil wurden einzelne Exemplare derart gross, dass Schäden am Belag zu beobachten waren und ein normaler Schnitt mit dem Böschungsmähwerk nicht mehr möglich war.

3.2.4 Schlussfolgerungen (Veränderungen der Flora)

Die Flora blieb unverändert in Bankettabschnitten, die weiterhin gemäht oder gemulcht wurden. Im beobachteten Zeitraum nahm durch diese Bankettpflege also die Dichte der Problempflanzen nicht zu.

Jedes Unkrautbekämpfungs-Verfahren veränderte die botanische Zusammensetzung im behandelten Bankettbereich:

- Methoden, die den vorhandenen Bewuchs vollständig abtöteten und mindestens kurzfristig zu einem unbewachsenen, offenen Boden führten, erlaubten aus Samen auflaufenden Pflanzen eine Neubesiedlung (systemische Blattherbizide, Abbranden).
- Führt die Methode nur zu einer vorübergehenden Reduktion der Blattmasse, so wurden vorwiegend Ausläuferpflanzen selektioniert, die entweder dank ihrer in den oberirdischen Stolonen gespeicherten Energie sofort nach der Behandlung wieder austreiben konnten oder die von unbehandelten Bankett her in die behandelte Zone mit geschwächtem Bewuchs eindringen konnten (thermische Bekämpfung).
- Ein vollständiges Abtöten der vorhandenen Pflanzen mit anschliessender "Versiegelung" der Bodenoberfläche verhinderte für einige Zeit das Neuauflaufen von Keimlingen. Je nach Vegetation im angrenzenden unbehandelten Bankettbereich konnten sich in diesen offenen Flächen Ausläuferpflanzen ausbreiten (Bodenherbizide).

3.3 Bodenbedeckungsverlauf

3.3.1 Blattherbizide

Zu Versuchsbeginn Mitte Mai 1992 wurde zur Homogenisierung der Pflanzenbestände in allen Parzellen mit Bodenherbiziden und in den Unterverfahren mit Blattherbiziden eine "Sanierung" mit Glyphosate durchgeführt. Alle Parzellen der mechanischen-, thermischen- und Kontroll-Verfahren der Blattherbizide wurden nicht behandelt. Diese Sanierung zeigte bei allen Verfahren und Standorten eine nachhaltige Wirkung, welche noch im Sommer ein Jahr nach der Behandlung beobachtet werden konnte. Zwei Jahre nach der Applikation war die Vegetation von den unbehandelten Kontrollen nicht mehr zu unterscheiden.

In den Kontrollparzellen war über Winter ein relativ starker Rückgang der Bodenbedeckung zu beobachten.

Glyphosate, Glufosinat und Wuchsstoffe im Herbst eingesetzt, zeigten im Vergleich zu unbehandelten Flächen eine sehr schlechte Wirkung im folgenden Frühling.

Verfahren mit nur im Herbst appliziertem Glyphosate oder anderen Blattherbiziden kamen nur im Rinnenversuch von Wädenswil zur Anwendung. Weil in diesem Versuch die Vegetationsaufnahmen hauptsächlich qualitativ gemacht wurden und die Wachstumsbedingungen in Rinne und Bankett stark unterschiedlich waren, können diese Resultate nicht direkt mit den Bedeckungsgraden der Versuche im Bankettbereich verglichen werden. In der Rinne wurden nur Pflanzenanzahl und Pflanzenart erfasst. Die in Wädenswil mitberücksichtigte Wasserrinne jeder Parzelle konnte wegen zu grosser Heterogenität der enthaltenen Pflanzen statistisch nicht ausgewertet werden. Es konnten aber die gleichen Tendenzen wie im Bankett beobachtet werden. Die absolute Dichte der Pflanzen in den mit Blattherbiziden behandelten Rinnen war immer kleiner als eine Pflanze pro Meter (Kontrolle 0.5 - 3 Pflanzen pro Meter).

Die Bodenbedeckung in den nur gemähten Kontrollen wies in **Knönau** relativ grosse Fluktuationen auf. Die hohe Bodenbedeckung durch Sommerannuelle (max. 70 - 80 % im Juli/August, Abb. 10) nahm nach deren Absterben im Herbst auf Winterbedeckungsgrade von 30 - 50 % ab. Die Glyphosate-Applikationen im Mai erfolgten somit teilweise in die Phase zunehmender Bodenbedeckung und zögerten die erneute sommer

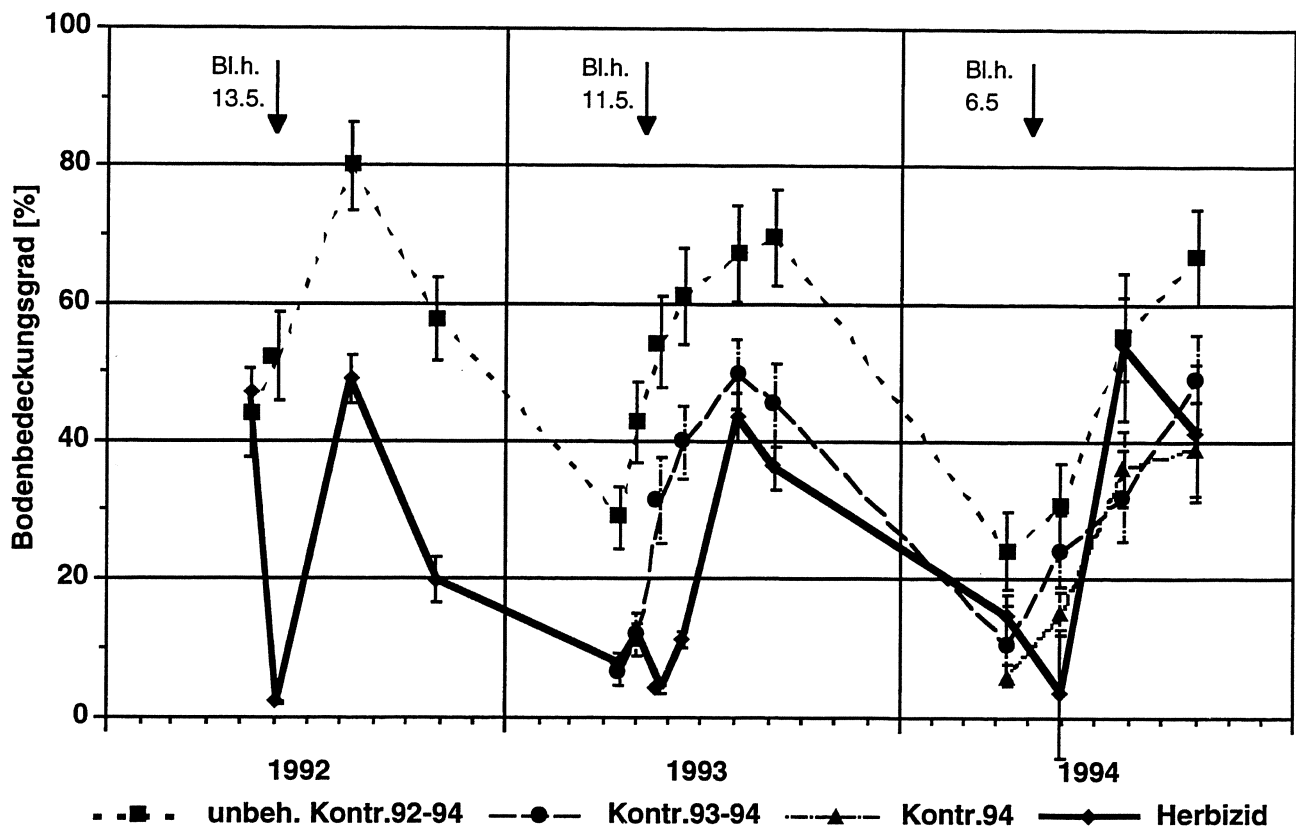


Abbildung 10: Durchschnittliche Bodenbedeckung ($\pm$ Standardfehler) aller untersuchten Blattherbizide in Knonau; behandelte Teilparzellen jeweils 10 x 0.5 m. Verfahren und Applikationsmengen vgl. Methodikteil. Applikation der Blattherbizide (Bl.h.) durch Pfeil gekennzeichnet. "Unbeh. Kontr.92-94": gar nie behandelte Kontrolle; "Kontr.93-94" wurde nur 1992 behandelt und diente als Kontrolle für die Wirkung der Herbizidapplikation 1993; dito "Kontr.94".

liche Zunahme um durchschnittlich 2 - 3 Monate hinaus (im Vergleich zur vollständig unbehandelten Kontrolle).

Eine zusätzliche Glyphosate-Behandlung im Herbst 1992 hatte in Knonau eine geringe Wirkung, die Herbstbehandlungen 1993 zeigten im folgenden Frühling dagegen tendenziell einen gewissen Erfolg. Herbstbehandlungen mit Glufosinat oder Foxtril P hingegen reduzierten im Folgejahr die Bodenbedeckung nicht (Daten nicht gezeigt, vgl. auch Standort Bad Ragaz und Diskussion der Blattherbizide).

In **Bad Ragaz** war der Verlauf der Bodenbedeckung in den sich entsprechenden Verfahren ähnlich wie in Knonau, allerdings auf leicht höherem Bodenbedeckungsniveau (Abb. 11 oben und 10).

Die Glyphosate-Applikationen erfolgten bei einem Bedeckungsgrad von mindestens 30 %. Die resultierende Reduktion war überall sehr gut, aber wie in Knonau nicht sehr nachhaltig. Die Wirkung von Glyphosate war im Wirkungsversuch und im Methodenvergleich ähnlich, jedoch waren die Fluktuationen in der Bodenbedeckung im Methodenvergleich höher, bedingt durch die stärker schwankenden Wachstumsbedingungen, je näher am Randabschluss sich Pflanzen befinden (Abb. 11 oben und unten).

Die Herbstbehandlungen mit Glyphosate, Glufosinat und Foxtril P zeigten in Bad Ragaz eine bessere Wirkung als in Knonau.

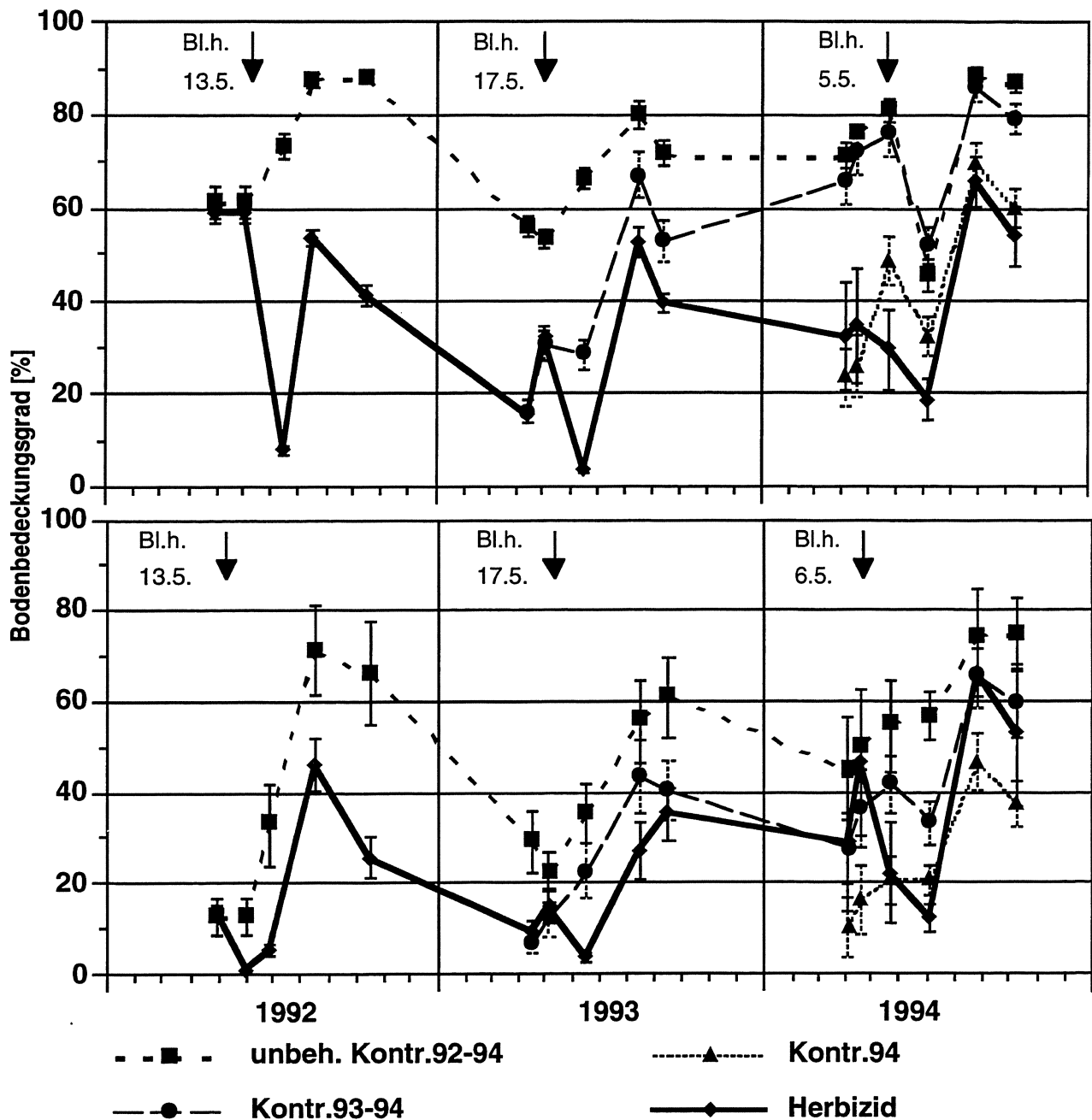


Abbildung 11: Durchschnittliche Bodenbedeckung ($\pm$ Standardfehler) aller untersuchten Blattherbizide in Bad Ragaz. Oben: Behandelte Teilparzellen jeweils 10 x 0.5 m. Unten: Behandelte Teilparzellen jeweils 20 x 0.25 m (Methodenversuch). Verfahren und Applikationsmengen vgl. Methodikteil. Applikation der Blattherbizide (Bl.h.) durch Pfeil gekennzeichnet. "Unbeh. Kontr.92-94": gar nie behandelte Kontrolle; "Kontr.93-94" wurde nur 1992 behandelt und diente als Kontrolle für die Wirkung der Herbizidapplikation 1993; dito "Kontr.94".

In Wädenswil wurde die Wirkung der Blattherbizide im Methodenvergleich untersucht. Im Gegensatz zu den andern Standorten war die Zunahme der Bodenbedeckung im Sommer in den behandelten Parzellen weniger stark, gleichzeitig aber die unbehandelten 25 cm breiten Kontrollen recht stark bewachsen (Abb. 12).

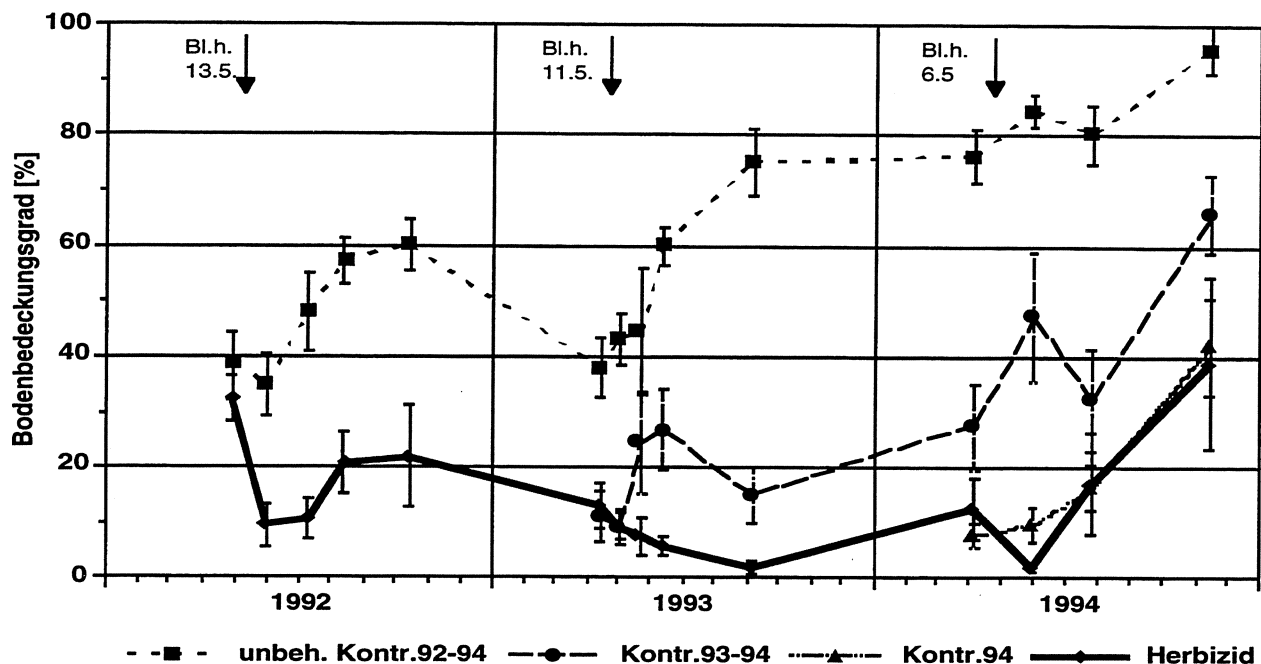


Abbildung 12: Durchschnittliche Bodenbedeckung ($\pm$ Standardfehler) aller untersuchten Blattherbizide in Wädenswil; behandelte Teilparzellen jeweils 20 x 0.25 m. Verfahren und Applikationsmengen vgl. Methodikteil. Applikation der Blattherbizide (Bl.h.) durch Pfeil gekennzeichnet. "Unbeh. Kontr.92-94": gar nie behandelte Kontrolle; "Kontr.93-94" wurde nur 1992 behandelt und diente als Kontrolle für die Wirkung der Herbizidapplikation 1993; dito "Kontr.94".

Diskussion der Blattherbizide

Im Frühjahr applizierte Blattherbizide wiesen an allen Standorten eine sehr effiziente Wirkung auf. Die Wirkungsdauer war abhängig von der botanischen Zusammensetzung und vom Wachstumsstadium des behandelten Bestandes. Wurde wie zu Versuchsbeginn 1992 ein Bestand mit vorwiegend mehrjährigen Pflanzen in einem Stadium mit sehr gut entwickelter Sprossmasse behandelt, so fiel einerseits relativ viel absterbendes Pflanzenmaterial an, das den Boden noch einige Wochen bedeckte und so den Neuaufbau verzögerte. Andererseits war vermutlich der Vorrat an keimbereiten Samen an der Bodenoberfläche noch etwas geringer als in den folgenden Jahren mit einem hohen Anteil an Samenunkräutern im Bestand. Die Behandlung von eher schlecht entwickelter Pflanzenmasse im Frühjahr 1993 und 1994 (unter 20 % Bodenbedeckung) war eindeutig zu früh, um die unterdrückende Wirkung der absterbenden Pflanzenmasse ausnützen zu können. Wird durch eine Behandlung das Ziel einer flächigen Elimination des Bewuchses auf dem Bankett verfolgt, so sollte mit der Applikation von Glyphosate so lange zugewartet werden, bis sicher genügend Blattmasse gebildet ist. An den Versuchsstandorten wäre dies ungefähr Ende Mai bis Juni der Fall. Wird allerdings zu lange gewartet, besteht die Gefahr, dass einige Pflanzen bereits ausgereifte Samen gebildet haben.

Denkbar wäre eine Entscheidung aufgrund der Gesamtbodenbedeckung auf dem zu behandelnden Streifen. Nach unserem Dafürhalten wäre bei mindestens 50 % Bodenbedeckung ein sinnvoller Wert zur Behandlung. Eine Entscheidung könnte sich auch auf die primär zu bekämpfenden Problempflanzen stützen und deren

empfindlichste Wachstumsstadien als Interventionszeitpunkt bezeichnen. Dieses Vorgehen ist zur Einzelpflanzenbekämpfung unerlässlich.

Der markante Rückgang der Bodenbedeckung über Winter war vor allem auf das starke Vorkommen einjähriger Arten zurückzuführen. Durch die lockere Grasnarbe und den Herbstschnitt (ca. September) wurde bei der letzten Aufnahme im Oktober der visuelle Eindruck einer geringen Bodenbedeckung sicher noch unterstützt.

Eine frühe Herbstbehandlung mit Glyphosate am 20. August 1992 war weniger erfolgreich als eine spätere Mitte bis Ende Oktober 1993. Foxtril-P und Glufosinat im Herbst appliziert wirkten sehr schlecht. Foxtril-P braucht für eine gute Wirkung genügend Wärme und optimale Wachstumsbedingungen, die im Versuch gewählten Behandlungszeitpunkte im Spätherbst waren somit wahrscheinlich zu spät. Die etwas bessere Wirkung in Bad Ragaz könnte auf die wärmere Witterung zurückgeführt werden. Ein weiterer Grund für die schlechte Herbstwirkung ist vor allem in der Artenzusammensetzung zu suchen. Durch die grossen Anteile an einjährigen Pflanzen war über Winter immer ein natürlicher Rückgang der Bodenbedeckung zu beobachten (Sommerannuelle gehen beim ersten Frost ein). Somit zeigte sich, dass zusätzliche Herbstapplikationen auf den vorhandenen Versuchsstandorten nicht sinnvoll waren. Bei mehrjährigen Pflanzenarten und warmen, wüchsigen Bedingungen im Herbst hingegen kann bei Problempflanzen wie *Rubus* und *Clematis* lokal eine Herbstbehandlung sinnvoll sein (Müller 1993). Diese Pflanzen verlagern im Herbst applizierte herbizide Wirkstoffe in ihre Überwinterungsorgane und sterben spätestens im folgenden Frühjahr ab.

3.3.2 Bodenherbizide

Die überprüften Bodenherbizide sind mit Ausnahme von Dichlobenil nur gegen keimende Samen (Oryzalin) oder frisch gekeimte Jungpflanzen (Flurochloridon und Prosulfocarb) wirksam. Waren also schon ältere Pflanzen vorhanden, so mussten diese zusätzlich mit einem Blattherbizid bekämpft werden. Der Effekt der Bodenherbizide beschränkte sich somit auf die Verhinderung einer sofortigen Neuverunkrautung nach der Blattherbizid-Anwendung.

Die verschiedenen Bodenherbizid-Varianten bewirkten unabhängig von Wirkstoff und Standort grundsätzlich einen ähnlichen Bodenbedeckungsverlauf, zeigten jedoch unterschiedliche Amplituden zwischen Mindest- und Maximalbedeckung und unterschiedliche Wirkungsdauer. Insgesamt war durch die zusätzliche Anwendung der Bodenherbizide zu den Blattherbiziden die Gesamtbodenbedeckung erwartungsgemäss deutlich tiefer als bei reinem Blattherbizid-Einsatz (Abb. 10 - 13). Allerdings wurde mit keinem der ausgewählten Bodenherbizide eine saisonlange vollständige Unkrautfreiheit erreicht, wie das mit anderen Stoffen in höherer Dosierung möglich wäre (z.B. Triazine und Phenylharnstoffe).

Die Behandlungen 1992 wirkten durchwegs schlecht, da die Applikationen nicht auf den Boden, sondern auf das abgestorbene Pflanzenmaterial der einen Monat früher durchgeführten "Sanierungsbehandlung" mit Glyphosate erfolgte.

Spätere Applikationen Ende Mai bis Mitte Juni wirkten nachhaltiger als jene Mitte April.

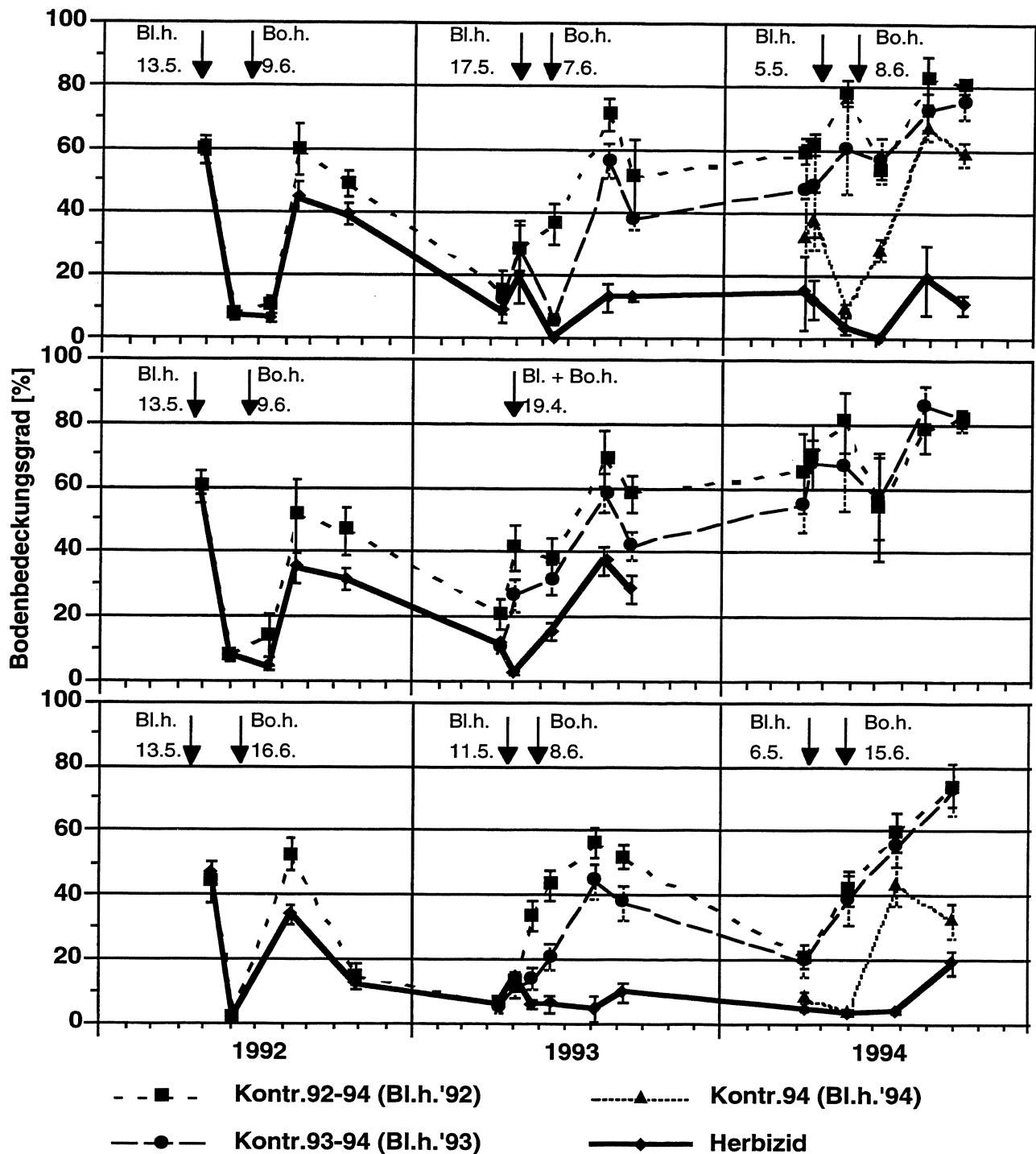


Abbildung 13 : Durchschnittliche Bodenbedeckung (± Standardfehler) aller untersuchten Bodenherbizide in Bad Ragaz und Knonau; behandelte Teilparzellen jeweils 10 x 0.5 m. Verfahren und Applikationsmengen vgl. Methodikteil. Applikation der Blatt- und Bodenherbizide (Bl.h. und Bo.h.) durch Pfeil gekennzeichnet. "Kontr.92-94 (Bl.h.'92)": gar nie mit Bo.h. behandelte Kontrolle, Bl.h. nur 1992; "Kontr.93-94 (Bl.h.'93)" wurde nur 1992 mit Bo.h. behandelt und 1993 nur mit Bl.h. diente als Kontrolle für die Wirkung der Herbizidapplikation 1993; dito "Kontr.94 (Bl.h.'94)". **oben:** Splittapplikation Blattherbizid und Bodenherbizid in Bad Ragaz. **Mitte:** 1993 frühe Applikation von Blatt- und Bodenherbizid im Tankmix in Bad Ragaz. **unten:** Durchschnittliche Bodenherbizid-Wirkung in Knonau, Splittapplikationen Mai Blattherbizid, Juni Bodenherbizid

Der Bedeckungsgrad der Bodenherbizid-Varianten erreichte vor der Applikation bis Anfang Juni teilweise ca. 30 - 40 %. Dies liegt im Bereich, wo eine gleichzeitige Applikation von Boden- und Blattherbizid nicht mehr sinnvoll ist und eine zeitlich getrennte Anwendung erfahrungsgemäss besser wirkt (Gut et al. 1993).

Die Wirkung einer frühen, kombinierten Blatt- und Bodenherbizid-Behandlung (19.4.93) war bereits nach ca. 40 Tagen ungenügend (Abb. 13 Mitte). Nachhaltiger war, die Blattherbizid-Behandlung Mitte bis Ende Mai und im Juni eine separate Bodenherbizid-Applikation durchzuführen (Abb. 13 oben und unten).

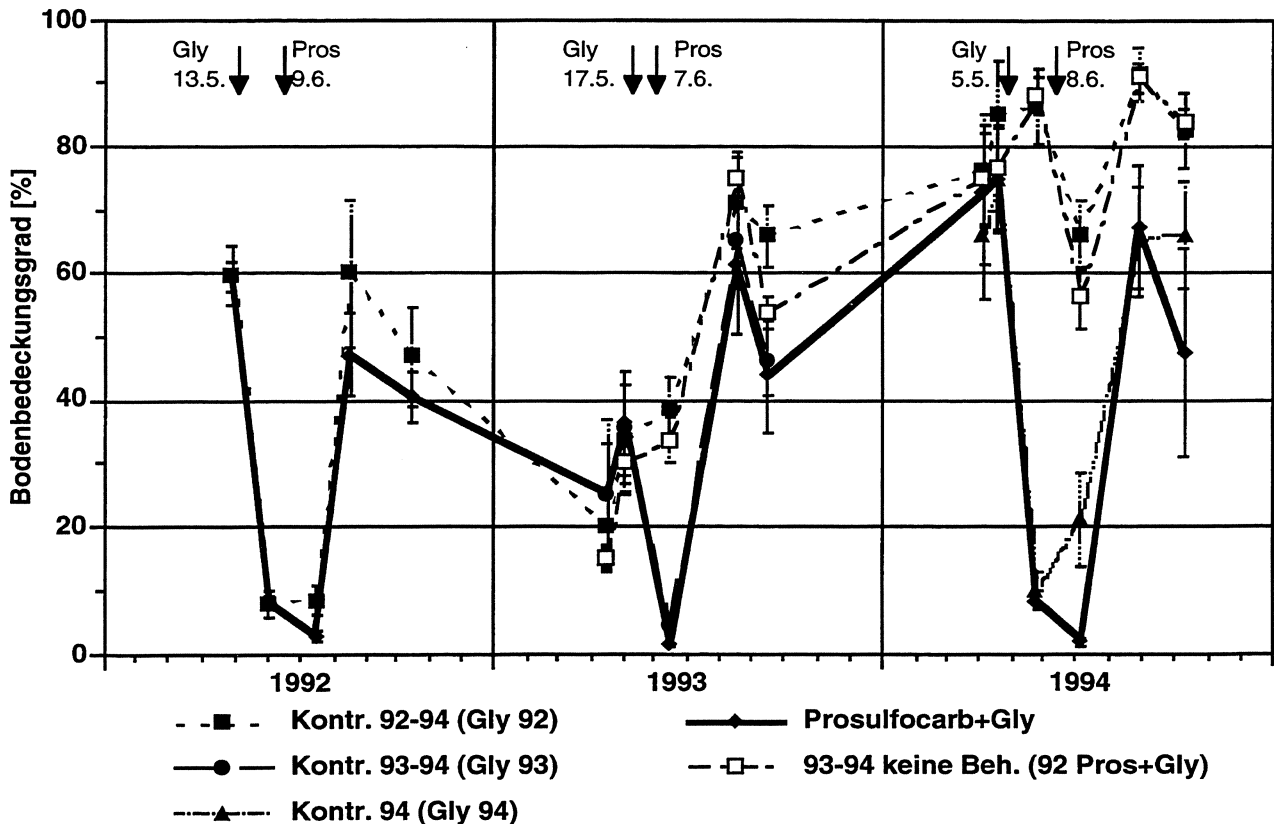


Abbildung 14: Durchschnittliche Bodenbedeckung ($\pm$ Standardfehler) der untersuchten Prosulfocarb-Parzellen in Bad Ragaz; behandelte Teilparzellen jeweils 10 x 0.5 m. Verfahren und Applikationsmengen vgl. Methodikteil. Applikation von Glyphosate (Gly) und Prosulfocarb (Pros) durch Pfeil gekennzeichnet. "Kontr.92-94 (Gly 92)": gar nie mit Pros behandelte Kontrolle, Gly nur 1992; "Kontr.93-94 (Gly 93)" wurde nur 1992 mit Pros behandelt und 1993 nur mit Gly diente als Kontrolle für die Wirkung der Herbizidapplikation 1993; dito "Kontr.94 (Gly 94)".

In Knonau hatte **Prosulfocarb** eine mit den andern Bodenherbiziden vergleichbare Wirkung, wobei die schlechte Wirkung im ersten Jahr sehr ausgeprägt war. In Bad Ragaz konnte über alle drei Jahre praktisch keine zusätzliche Wirkung von Prosulfocarb im Vergleich zu Blattherbizid allein festgestellt werden (Abb. 14).

Dichlobenil war nur bei einer Aufwandmenge von 9 kg a.i./ha vergleichbar mit den restlichen Bodenherbiziden. Die drei Dosierungen von 1.5, 4.5 und 9 kg a.i./ha zeigten den Zusammenhang zwischen Dosierung und Wirkung an beiden Standorten deutlich auf. Die beiden unteren Dosierungen lagen aber nur tendenziell unter den unbehandelten Kontrollparzellen, einzig mit 9 kg a.i./ha wurde an beiden Standorten eine signifikant nachhaltigere und bessere Wirkung während beiden Versuchsjahren erzielt (Abb. 15).

Die späte Applikation Anfang Juni 1993 unterdrückte die Sommerkeimwelle, jene von Mitte April 1994 nicht.

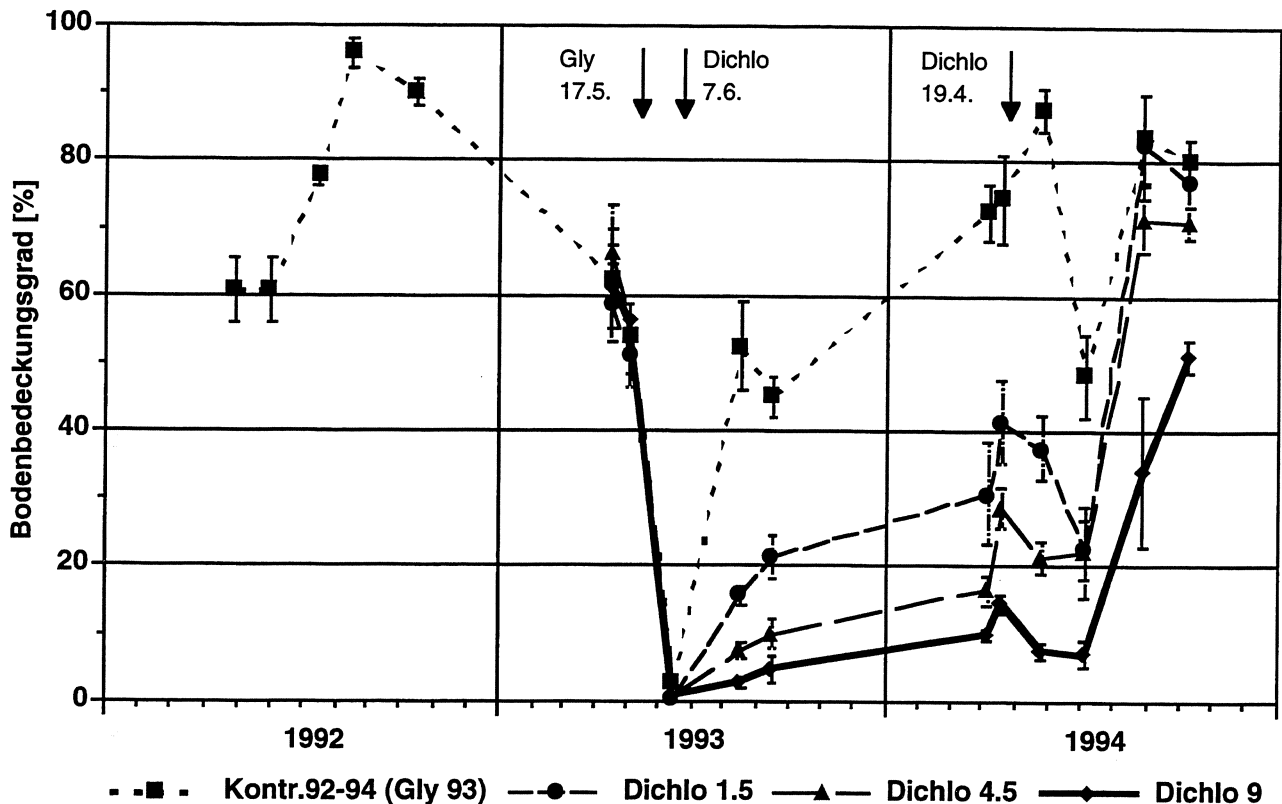


Abbildung 15: Durchschnittliche Bodenbedeckung ($\pm$ Standardfehler) der untersuchten Dichlobenil-Parzellen in Bad Ragaz; behandelte Teilparzellen jeweils 10 x 0.5 m. Verfahren und Applikationsmengen vgl. Methodikteil. Applikation von Dichlobenil (Dichlo) und Glyphosate (Gly) durch Pfeil gekennzeichnet. "Kontr.92-94 (Gly'93)": nur 1993 mit Gly behandelte Parzellen welche als Kontrolle für die Wirkung der Herbizidapplikation 1993 und 1994 dienten; Wirkung verschiedener Dosierungen von Dichlobenil 1.5, 4.5 und 9 kg a.i. pro Hektare "Dichlo 1.5"; "Dichlo 4.5"; "Dichlo 9".

Diskussion der Bodenherbizide

Die Bodenherbizide vermochten den Neuaufbau von Jungpflanzen im Vergleich zur alleinigen Blattherbizid-Anwendung im allgemeinen deutlich hinauszögern. So stieg die Gesamtbodenbedeckung bei sachgemässer Applikation denn auch in praktisch keinem Versuch über 20 % an. Ausnahmen waren auf verschiedene Ursachen zurückzuführen:

- Schlechte Verteilung des applizierten Bodenherbizides auf der Bodenoberfläche führte dazu, dass 1992 allgemein ein eher stärkerer und früherer Auflauf neuer Pflanzen zu verzeichnen war als in den folgenden Jahren. Ursache war die grosse Masse abgestorbenen Pflanzenmaterials von der ca. vier Wochen vorher erfolgten Blattherbizid-Applikation. Eine gleichmässige Benetzung des Bodens mit dem herbiziden Wirkstoff war dadurch nicht möglich. Dieses Problem tritt jedoch im allgemeinen nur dann auf, wenn im Vorjahr keine Unkrautbekämpfung durchgeführt wurde. Die Verteilung auf dem Boden kann verbessert werden durch die Anwendung höherer Spritzbrühmengen (Aktivsubstanzmenge pro Fläche jedoch gleichbleibend!) oder durch längeres Zuwarten nach der Blattherbizid-Anwendung, so dass ein grösserer Anteil des abgestorbenen Pflanzenmaterials schon im Abbaustadium ist.

- Der Applikationstermin spielt auch bei Bodenherbiziden eine grosse Rolle. Wurde schon im Frühjahr behandelt, so konnte die Sommerkeimwelle von z.B. *Setaria* (Borstenhirsen) nicht genügend unterdrückt werden; teilweise wurden die Hirsen gar gefördert, da der offene Boden im Mai/Juni bessere Wachstumsbedingungen bot. Mit einer Behandlung im Frühsommer (Ende Mai/Juni) konnten die Sommerkeimer besser in Schach gehalten werden. Allerdings kann dann die vorhandene Vegetation eine kritische Masse erreichen, welche eine optimale Verteilung des Bodenherbizides verhindert.

Die eher bessere Wirkung in den Jahren 1993 und 1994 dürfte darauf zurückzuführen sein, dass die Applikationen unter den oben erwähnten günstigeren Voraussetzungen erfolgten.

Die Frage, ob eventuell eine Nachwirkung der Vorjahresbehandlung mit Bodenherbizid vorlag - durch eine allfällige Akkumulation von Wirkstoff - kann mit grösster Wahrscheinlichkeit verneint werden. Die jeweils nicht mehr behandelten Kontrollen wiesen nämlich zum grossen Teil im ersten Jahr nach der Bodenherbizid-Behandlung einen Neubewuchs auf, der statistisch nicht gesichert geringer war als die gar nicht mit Bodenherbizid behandelten Kontrollen.

Gegen eine Akkumulation sprechen im weiteren die Abbaupzeiten der eingesetzten Wirkstoffe: Oryzalin: 35 - 65 Tage (Domsch 1992); Flurochloridon: 20 - 50 Tage (Perkow 1992). Ebenfalls dagegen sprechen die eher ungünstigen Adsorptionsbedingungen im Bankett.

Aufgrund der Erfahrungen von Müller (1993) auf Gleisbanketten wurden auch in den vorliegenden Versuchen die doppelten maximal empfohlenen Mengen Flurochloridon und Prosulfocarb verwendet. Wie der Versuch in Bad Ragaz zeigte, reichte die doppelte Prosulfocarb - Dosierung von 8.8 kg a.i. pro Hektare noch nicht aus. Prosulfocarb bringt deshalb im Vergleich zur reinen Blattherbizid-Anwendung einen sehr geringen Nutzen, der in keinem Verhältnis steht zur Anwendung sehr hoher Wirkstoffmengen.

Möchte man die Bodenherbizide in den gewählten Dosierungen ohne Blattherbizide verwenden, so dürfte ganzjährig kein Bewuchs aufkommen, da aufgelaufene Pflanzen sonst nicht mehr bekämpft würden. Dies würde entweder sehr hohe Dosierungen oder jährlich mehrere Applikationen bedingen. Beides ist aus Gründen einer möglichen Grund- und Oberflächengewässer-Gefährdung nicht möglich. Zudem haben sowohl Oryzalin als auch Flurochloridon Wirkungslücken, die rasch zur Selektion bestimmter Unkräuter führen würden.

Dichlobenil wirkte nur mit 9 kg a.i. pro Hektare, im Juni appliziert, ausreichend. Es ist fraglich, ob die von der schweizerischen Bewilligungsbehörde angestrebte reduzierte Menge von maximal 4 kg a.i. pro Hektare für den Strassenbereich noch ausreichend ist. Dagegen könnte bei schlechten Wachstumsbedingungen (z.B. wie in Knonau) eine reduzierte Dosierung von 4 kg a.i. pro Hektare knapp genügend sein.

Ein wesentlicher Punkt zur Wirkungsverbesserung liegt in der Applikationstechnik. Damit das Herbizid in den Boden eindringen und genügend Wirkstoff in der Bodenlösung verbleiben kann, sollten die Bodenherbizide auf feuchten Boden ausgebracht werden. Bei zu trockenem Boden wird ein sehr grosser Anteil des Wirkstoffs adsorbiert und so der Aufnahme durch Pflanzen entzogen. In extrem nassen Böden dagegen bleibt ein grosser Anteil gelöst und kann mit dem Bodenwasser in grössere Tiefen verlagert werden und ist somit ebenfalls nicht verfügbar für die Pflanzen. Allerdings ist zu beachten, dass bei gleichzeitiger

Anwendung von Blattherbiziden (Tankmischung) primär auf deren Applikationsbedingungen abgestützt wird (trockene Pflanzen, keine Niederschläge 4 - 6 Stunden nach der Anwendung, "wüchsige" Bedingungen).

3.3.3 Thermische Verfahren

Die beiden thermischen Verfahren unterschieden sich bezüglich Einfluss auf Artenzusammensetzung und Reduktion des Bodenbedeckungsgrades praktisch nicht. Beide Verfahren hatten bei vier (1992 und 1994) respektive sechs (1993) Behandlungen eine tendenziell sinkende Bodenbedeckung. Die unbehandelten Kontrollparzellen zeigten in der gleichen Periode eine steigende Tendenz. Mit diesen vier bis sechs Behandlungen konnte die Bodenbedeckung immer unter ca. 15 % gehalten werden und war damit diesbezüglich den Bodenherbiziden vergleichbar (Abb. 13 und 16).

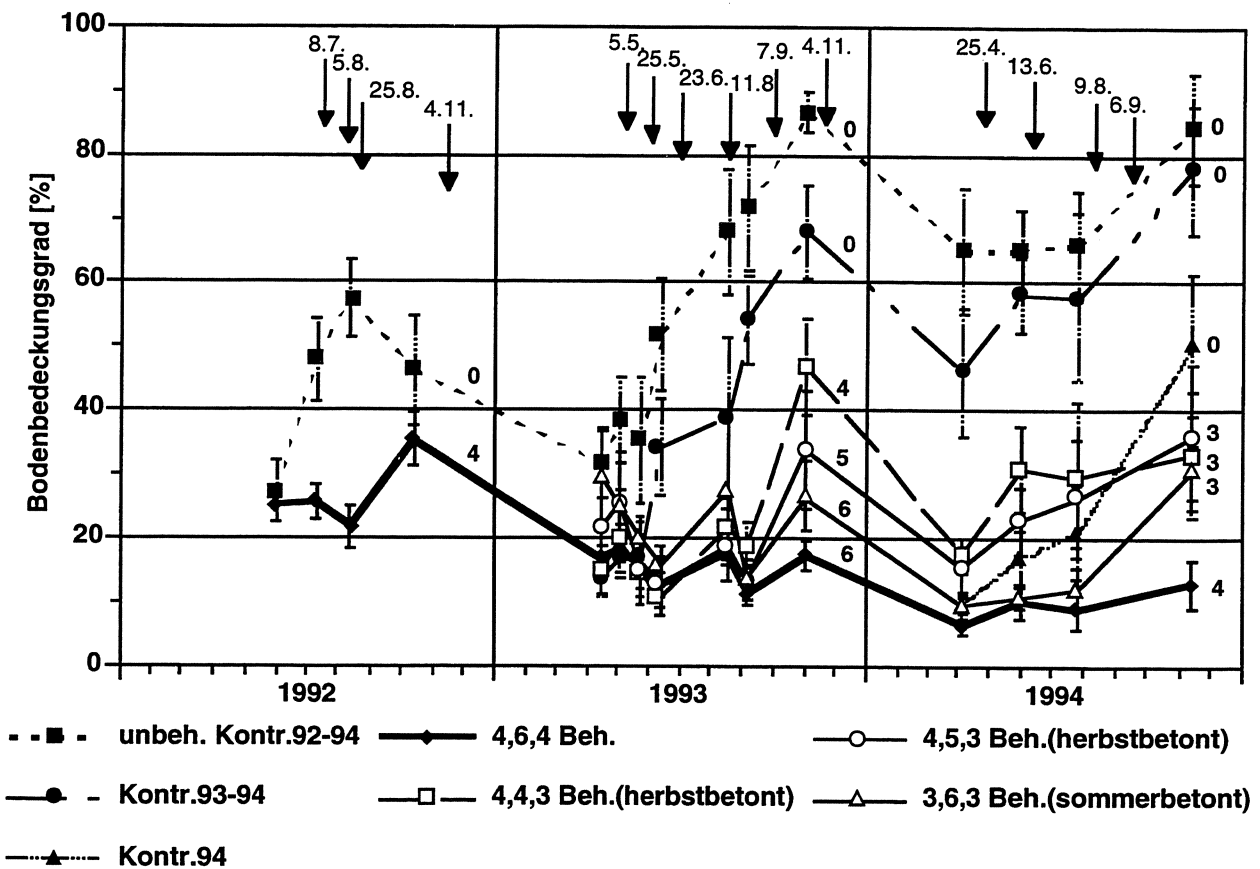


Abbildung 16: Durchschnittliche Bodenbedeckung ($\pm$ Standardfehler) aller untersuchten thermischen Verfahren in Wädenswil; behandelte Teilparzellen jeweils 20 x 0.25 m. Verfahren und Applikationsmengen vgl. Methodikteil. Zeitpunkt der Behandlung durch Pfeil und Datum gekennzeichnet. "Unbeh. Kontr.92-94": gar nie behandelte Kontrolle; "Kontr.93-94" wurde nur 1992 behandelt und diente als Kontrolle für die Wirkung der Behandlungen 1993; dito "Kontr.94". "4,4,3 Beh.(herbstbetont)" Ziffern in Abb. und Legende geben die jährliche Anzahl Behandlungen an, in Klammern Schwerpunkte der Behandlungen. Dito "4,5,3 Beh.(herbstbetont)" und "3,6,3 Beh. (sommerbetont)". Daten von Bad Ragaz sehr ähnlich und daher nicht gezeigt.

Nach einem Abbruch der Behandlungen nahm der Bewuchs rasch wieder zu, allerdings nach zwei Behandlungsjahren etwas schwächer als nach einem: Wurde im Frühling 1993 abgebrochen, so konnte noch keine nachhaltige Wirkung der Vorjahresbehandlung festgestellt werden. 1993 lag also die

Bodenbedeckung der 1992 behandelten Parzellen nur leicht unter jener der Kontrollflächen. Wurde dagegen 1992 und 1993 behandelt, so nahm die Bodenbedeckung bei einem Behandlungsabbruch 1994 nur langsam zu und erreichte die gänzlich unbehandelte Kontrolle nicht.

Die unterschiedliche Anzahl von vier bis sechs Behandlungen pro Jahr führte an beiden Versuchsstandorten in den drei Jahren nicht zu statistisch unterscheidbaren Bodenbedeckungen. Mit zunehmender Anzahl Behandlungen pro Jahr nahm der Bodenbedeckungsgrad tendenziell ab.

Welche der Behandlungen die grösste Wirkung zeigten, also jene vom Frühling, Sommer oder Herbst, konnte in der Reduktion der Bodenbedeckung nicht eindeutig nachgewiesen werden. Zu gross waren die Streuungen der einzelnen Parzellen. Behandlungen Ende Oktober oder Anfang November zeigten in Bad Ragaz keine und in Wädenswil nur eine geringe zusätzliche Wirkung. Uneinheitlich war die Wirkung bei Behandlungen im August und September.

Diskussion der thermischen Behandlungen

Die biologische Wirkung der thermischen Verfahren beruht auf der Vernichtung des oberirdischen Pflanzenmaterials. Durch die kurzfristige Erwärmung der Pflanzen auf 80 - 100° erfolgt eine Eiweissgerinnung (Protoplasma-Denaturierung) und die Pflanzenzellen sterben ab (Kreeb und Warnke 1994). Andere Untersuchungen gehen davon aus, dass die Pflanzen bereits bei wesentlich tieferen Temperaturen (ab 50°) irreversibel geschädigt werden und absterben (Rannertshauser 1990; Bertram und Meyer 1993). Die thermischen Behandlungen sind absichtlich so dosiert, dass es nicht zu einem Verbrennen der Pflanzen kommt. Auch wenn man also direkt nach der thermischen Behandlung keinen Effekt sieht, führt die Erwärmung trotzdem zu einem Absterben der oberirdischen Pflanzenmasse.

Die Wirksamkeit der Methode war deutlich von der Pflanzenart abhängig. Junge Samenunkräuter konnten sehr gut bekämpft werden, dagegen waren adulte, ausläufer- und pfahlwurzelbildende Pflanzen schlecht bekämpfbar. Aus Dosis-Wirkungs-Versuchen ist bekannt, dass auch die Pflanzengrösse für den Bekämpfungserfolg eine entscheidende Rolle spielt (Ascard 1994). Somit ist es wichtig, dass beim Einsatz thermischer Geräte die Behandlungen optimal auf den Vegetationsverlauf abgestimmt werden. Empfehlungen, zu Behandlungsbeginn in Abständen von 10 bis 14 Tagen zu behandeln, wären bezüglich der biologischen Wirkung sinnvoll, sind aber aus arbeitstechnischen und wirtschaftlichen Gründen nicht immer machbar (Schaffner 1995). Zudem waren die in den Versuchen eingesetzten Geräte so konstruiert, dass die Wärmeentwicklung auch bei älteren Pflanzenbeständen noch ausreichend war. Einzig bei sehr hohen und dichten Beständen musste die Arbeitsgeschwindigkeit entsprechend reduziert werden.

Da die thermischen Methoden nur die oberirdischen Pflanzenteile schädigen können, sind Pflanzen mit unterirdischen Regenerationsorganen und hohem Anteil an unterirdischer Biomasse praktisch nicht bekämpfbar. Im Gegensatz zu den Blattherbiziden wurden durch die thermischen Verfahren die neukeimenden Pflanzen während der ganzen Vegetationsperiode immer wieder vernichtet, so dass sich die nur geschwächten, nicht aber abgetöteten ausläuferbildenden Arten auf dem freiwerdenden Areal durchsetzen konnten. Die selektive Bekämpfung aller Samenunkräuter förderte damit die ausläufer- und pfahlwurzelbildenden Arten.

Ein Anstieg der Bodenbedeckung nach Behandlungsabbruch war zu erwarten. Allerdings war dieser Wiederanstieg bei den thermischen Verfahren tendenziell rascher als nach dem Einsatz von Blattherbiziden, bedingt durch die überlebenden mehrjährigen Pflanzen. Ebenfalls ist aus zahlreichen Untersuchungen bekannt, dass sich eine nachhaltige Wirkung bei alleiniger thermischer Bekämpfung erst nach zwei bis vier Jahren einstellt, bedingt durch die mehrjährigen Pflanzen. Dies zeigen auch die vorliegenden Versuche eindeutig.

Eine zusätzliche Behandlung war bei dichtem Pflanzenbewuchs lohnender als eine bei lockerem Bewuchs. Da an beiden Standorten die klimatischen Verhältnisse und die Bodeneigenschaften für das Pflanzenwachstum relativ günstig waren, ist es fraglich, ob in den folgenden Jahren eine weitere Reduktion der Behandlungen unter vier pro Jahr möglich wäre.

Die propagierte Vorsorgewirkung einer späten Herbstbehandlung (Görgens 1992; Ebeling 1993) Ende Oktober oder im November konnte in keinem Versuch nachgewiesen werden (Abb. 16). Grund für die schlechte Herbstwirkung könnte die vorhandene Flora sein, war doch an beiden Standorten über Winter sowieso eine natürliche Reduktion der Bodenbedeckung eingetreten. In solchen Pflanzenbeständen dürfte eine letzte Behandlung Ende September oder Anfang Oktober genügen.

Beim Vergleich der Wirkung von thermischen Behandlungen mit Blattherbiziden muss differenziert werden: Die biologische Wirkung thermischer Behandlungen ist ähnlich derjenigen nicht-systemischer Blattherbizide (Kontaktherbizide, z.B. Glufosinat). Beide Verfahren töten nur die direkt getroffene Sprossmasse ab, nicht aber unterirdische Wiederaustriebsorgane wie Rhizome, Wurzelstöcke, Zwiebeln, usw. Zu einer länger-dauernden Freihaltung müssen die Behandlungen deshalb ständig wiederholt werden. Es können so gewisse mehrjährige Pflanzen unter Umständen langsam "ausgehungert" werden, und die Bodenbedeckung nimmt von Jahr zu Jahr allmählich ab. Darum sind mit zunehmender Behandlungsdauer zur Erzielung des gleichen Effekts immer weniger Behandlungen nötig. Der Vergleich thermischer Behandlungen mit systemischen Blattherbiziden (z.B. Glyphosate) ist dagegen weniger sinnvoll, da systemische Herbizide in der Pflanze verlagert werden und so auch die Regenerationsorgane vollständig abtöten. Eine solche "Sanierung" wäre deshalb allenfalls auch dort sinnvoll, wo anschliessend wiederaufkommender Bewuchs von Jungpflanzen problemlos thermisch unterdrückt werden könnte.

3.3.4 Mechanische Verfahren

Das mechanische Abranden mit einem Seilbesen zeigte eine recht gute Wirkung. Neben den Pflanzen wurden zusätzlich die obersten 5 -10 cm Humus abgetragen. In Wädenswil blieben nur kleine Reste der ursprünglich vorhandenen Pflanzendecke zurück (Abb. 17 unten). In Bad Ragaz war die Wirkung noch besser, da dort keine Stellplatten das Bankett von der Fahrbahn trennten (Abb. 17 oben).

Die maximale Bodenbedeckung nach einer alljährlichen Frühjahrsbehandlung betrug an beiden Standorten und in allen drei Jahren 10 - 20 %.

Eine zweite Behandlung im Herbst 1992 zeigte keinen zusätzlichen Effekt im Frühjahr 1993.

Eine nachhaltige Wirkung der Frühjahrsbehandlung über zwei Jahre konnte beim Verfahren mit einer Behandlung 1992 festgestellt werden. 1994 erfolgte in beiden Verfahren (nur 1992 behandelt; 1992 und 1993 behandelt) eine starke Zunahme der Bodenbedeckung. Sie blieb aber tendenziell unter dem

Kontrollverfahren. Unmittelbar nach einer Behandlung nahm in Wädenswil die Bodenbedeckung etwas rascher zu als in Bad Ragaz (Werte 1993 und 1994).

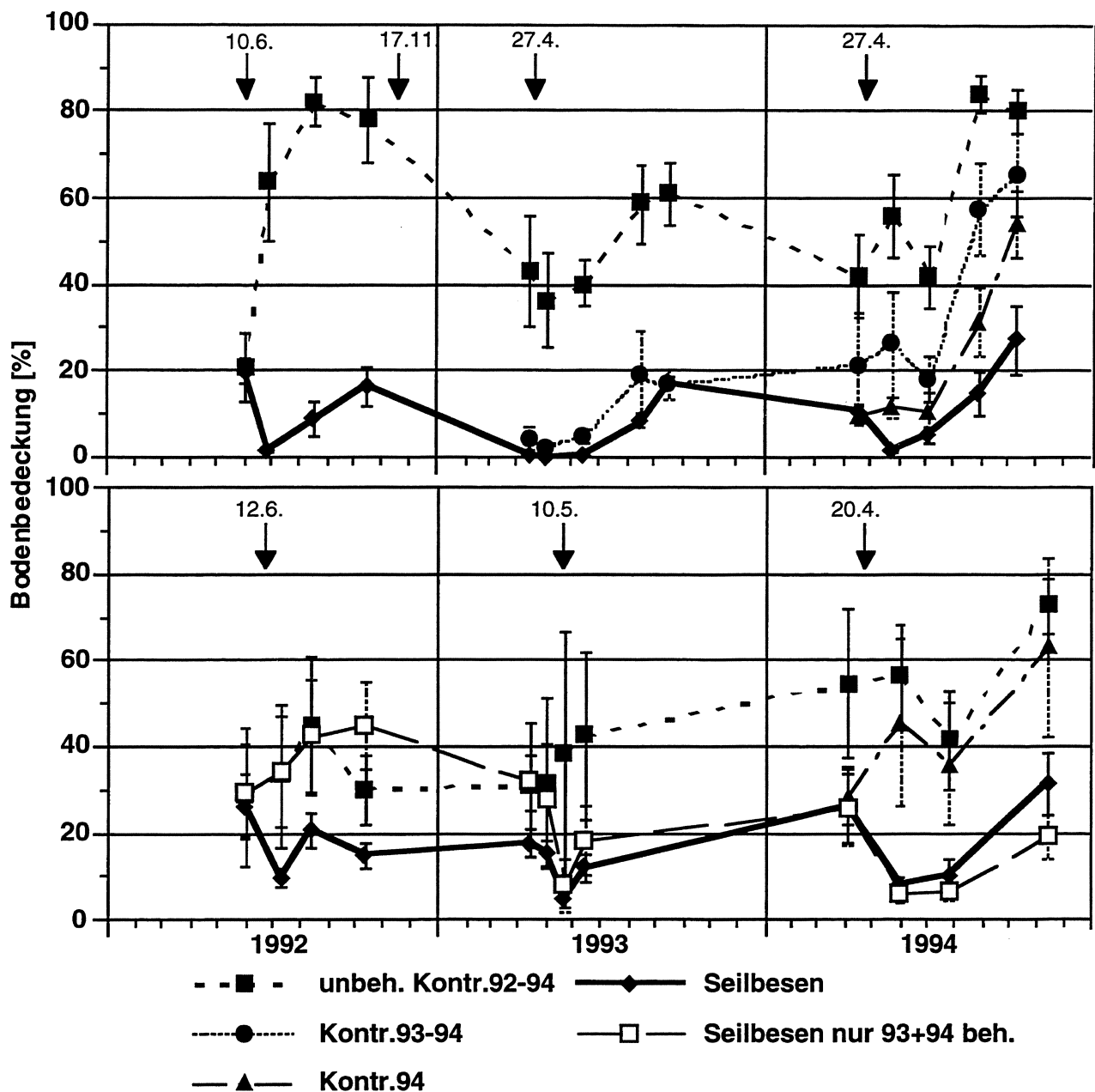


Abbildung 17: Durchschnittliche Bodenbedeckung ($\pm$ Standardfehler) unterschiedlicher Abrandintensitäten in Bad Ragaz (oben) und Wädenswil (unten); behandelte Teilparzellen jeweils 20 x 0.15 m. Verfahren und Applikationsmengen vgl. Methodikteil. Zeitpunkt der Behandlung durch Pfeil und Datum gekennzeichnet. "Unbeh. Kontr.92-94": gar nie behandelte Kontrolle; "Kontr.93-94" wurde nur 1992 behandelt und diente als Kontrolle für die Wirkung der Behandlungen 1993; dito "Kontr.94". "Seilbesen" 1992 zweimal, 1993 und 1994 einmal jährlich abranden mit Drahtseilbesen.

Diskussion Seilbesen, Abranden

Die unterschiedlichen Randabschlüsse von Bad Ragaz und Wädenswil waren für die Qualität und Geschwindigkeit der Arbeit entscheidend.

Ohne Stellplatten in Bad Ragaz konnte der Seilbesen alles Material sehr schnell und sauber entfernen, und es blieb wenig Feinmaterial zurück. In Wädenswil musste der Seilbesen dagegen sehr genau geführt werden, damit alles Material hinter dem Abschlussstein entfernt werden konnte. Trotzdem blieb Pflanzen- und Humusmaterial in der ca. 10 cm breiten Rinne zurück. Dies war der Grund für die raschere Zunahme der Bodenbedeckung in Wädenswil im Vergleich zu Bad Ragaz. Klimatische Unterschiede spielten eine zusätzliche Rolle. So herrschten im Sommer in Bad Ragaz stellenweise sehr trockene Bedingungen, was für die sommerkeimenden Pflanzen in diesem Verfahren schlecht war. Der stärkere Anstieg der Bodenbedeckung 1994 kann auch durch die Zunahme der annuellen Pflanzen mitverursacht worden sein. 1992 waren noch praktisch keine Annuellen vorhanden, 1993 etablierten sich einige und bildeten Samen, welche dann 1994 neu keimten. Die frühere Behandlung (20. 4. 1994) in Wädenswil im Vergleich zu den früheren Jahren könnte ein weiterer Grund gewesen sein für die raschere Zunahme der Bodenbedeckung. Optimalerweise sollte diese Massnahme erst Ende Mai oder im September durchgeführt werden.

Die mechanische Behandlung mit dem Seilbesen kann nicht direkt mit den übrigen Verfahren verglichen werden. Das Abranden entspricht eher einer Sanierungs-Massnahme mit einer Wirkung über einen längeren Zeitraum, während die anderen Verfahren eher Symptombekämpfung sind, welche die Ursachen - das Vorhandensein von Humus als Substrat für Samen - nicht beheben. Durch die Aufnahme des Humus beim Abranden mit dem Seilbesen wurde sehr stark in die Lebensgrundlagen der Pflanzen eingegriffen.

Die unmittelbare biologische Wirkung dieses Verfahrens war sicher den anderen überlegen, bot aber durch den hohen Materialanfall zur Entsorgung andere Probleme.

Flachstahlbesen in Wasserrinne

Das Verfahren mit einem Flachstahlbesen an einer Strassenkehrmaschine wurde nur in Wädenswil getestet. Es wurde die Fuge Fahrbahnbelag - Abschlussstein behandelt und die Veränderung der Flora ausgewertet. Die Behandlungen zeigten eine starke Reduktion des Pflanzenmaterials (Abb. 18). Nach jeder Behandlung liefen relativ rasch neue Sämlinge auf, aber auch etablierte Pflanzen wie *Taraxacum officinale* und *Plantago media* konnten wieder austreiben, da nur das Sprossmaterial entfernt wurde durch den Besen.

Mit drei Behandlungen 1992 und 1993 und zwei 1994 lag die Anzahl Pflanzen in der Wasserrinne (2 - 4 Pflanzen pro Meter) nur tendenziell unter jener der unbehandelten Kontrollen.

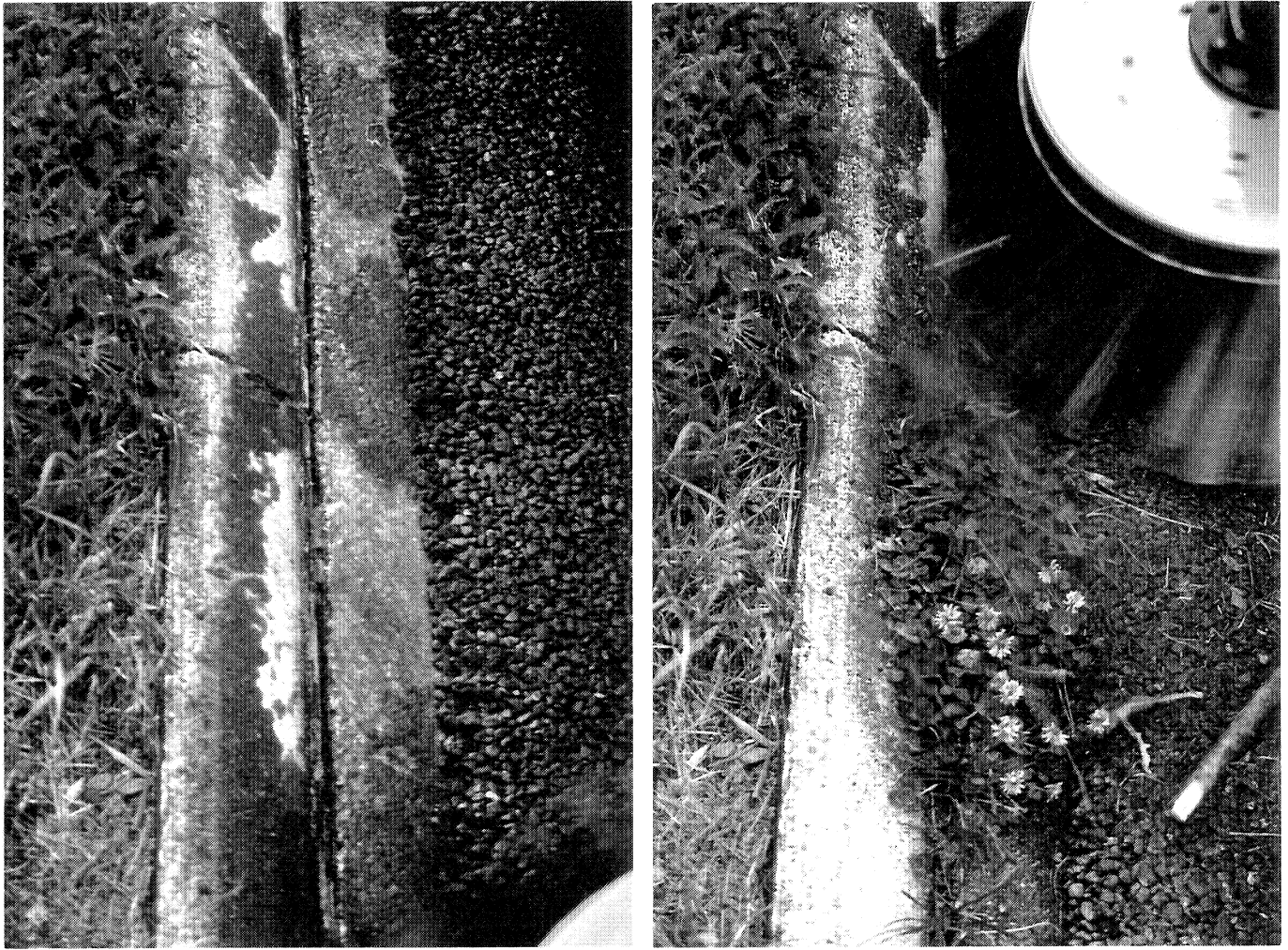


Abbildung 18: Vor und nach einer Behandlung der Wasserrinne mit dem Flachstahlbesen in Wädenswil, Verfahren und Behandlungstermine vgl. Methodikteil. links: Behandelt, rechts: unbehandelte Kontrolle. Aufnahmedatum: Oktober 1994.

Diskussion Flachstahlbesen

Wie bei allen Verfahren in Wädenswil war die Ausgangssituation der Rinne sehr heterogen. Je schlechter der bauliche Zustand des Überganges, desto mehr Pflanzen konnten aus den Rinnen wachsen.

Wenn mit dem Flachstahlbesen nicht die gleiche Wirkung wie bei den chemischen Varianten erzielt wurde, so konnte trotzdem eine Reduktion des Pflanzenmaterials in der Wasserrinne festgestellt werden. Allerdings war zu beobachten, dass sich durch das ca. 1 - 3 cm tiefe Herausputzen in der Rinne vermehrt Samen ansammelten und dass für diese erst noch bessere Keimbedingungen herrschten.

Problematisch war jedoch, dass mit der gewählten Anzahl Behandlungen Wurzelunkräuter nicht ausreichend bekämpft wurden. Wird nämlich über längere Zeit nur mit dem Flachstahlbesen gearbeitet, so wandert der Vegetationspunkt mehrjähriger Pflanzen immer tiefer nach unten und eine Bekämpfung wird zunehmend schwieriger.

Wie in Teil 5, Kapitel 5 "Kombination der Massnahmen" beschrieben, drängt sich hier das Zusammenspiel verschiedener Verfahren auf; auch deshalb, weil die Anzahl Behandlungen für eine genügende Wirkung noch erhöht werden müsste.

Im Vergleich zu den Methoden Wasser- oder Lufthochdruck wird beim Flachstahlbesen die Rinne zu wenig sauber gereinigt und die nötige Tiefe für ein Neuvergiessen mit Bitumen oder Mörtel fehlt.

3.4 Positive und negative Nebenwirkungen auf die Vegetation

Bei einigen Verfahren werden neben der effektiven Wirkung (Pflanzen beseitigen) zusätzlich positive oder negative Effekte erzielt. Nebenwirkungen auf Luft, Wasser und Boden sowie technisch-wirtschaftliche Aspekte werden auch in Teil 3 und 4 besprochen.

Ob die Elimination der Pflanzen in einem schmalen Bankettstreifen als positiv oder negativ zu bewerten sind ist fraglich, da der offene Raum schnell von Problempflanzen eingenommen werden kann (vgl. auch Teil 5).

3.4.1 Chemische Verfahren

Bei den chemischen Verfahren blieben abgestorbene Pflanzenteile und Humusansammlungen am Strassenrand liegen. Dieses Feinmaterial bot für vorhandene und aufliegende Samen wieder optimale Keimbedingungen. Die aufliegende Streuschicht verbesserte zusätzlich die Keimbedingungen durch Schutz vor allzu extremen Schwankungen der Temperatur und durch Konservierung von Feuchtigkeit.

3.4.2 Thermische Verfahren

Bei den thermischen Verfahren werden gemäss Görgens (1992) ca. 60 % der aufliegenden Samen mitvernichtet. Eigene Keimungstests bestätigten tendenziell, dass durch thermische Behandlungen die Keimfähigkeit reduziert wird. Von den zwei Pflanzenarten *Plantago major* und *Mentha ssp.*, welche am 6. September 1994 thermisch behandelt wurden, konnten im Labor mit verschiedenen Methoden keine Samen zur Keimung gebracht werden. Die unbehandelten Kontrollsamensamen von *Mentha ssp.* keimten zu ca. 20 % (mit Gibberellinsäure). Etwas besser keimten die unbehandelten *Plantago lanceolata*-Samen (ca. 40 % bei KNO₃-Behandlung).

Die Reduktion der Keimfähigkeit sollte an weiteren Pflanzenarten überprüft werden. Ebenfalls müsste bei weiteren Untersuchungen darauf geachtet werden, dass die verwendeten Samen in einem optimalen Reifezustand sind und gleiche Arten von behandelten und unbehandelten Pflanzen zur Verfügung stehen. Untersuchungen von Augustin (1990) zeigen zudem, dass die Samengrösse und die Arbeitsgeschwindigkeit wichtige Faktoren für die Vernichtung der Samen sind.

Neben dem positiven Aspekt der Abtötung des aufliegenden Samens ein Negativpunkt: Das dürre Pflanzenmaterial der vorangegangenen Behandlung wurde durch die erneute Behandlung in Brand gesetzt. So musste im Sommer immer genügend Löschwasser mitgeführt werden, um einen Brand der Böschung zu verhindern. Durch das Verbrennen des abgestorbenen Pflanzenmaterials erfolgte zudem eine unerwünschte Aschedüngung.

Eigene Untersuchungen zur Abschätzung möglicher Nebenwirkungen der Verfahren auf die Fauna wurden im vorliegenden Projekt nicht gemacht, vgl. dazu Teil 4 Kapitel 4.5.

3.4.3 Mechanische Verfahren

Positiv wirkte sich beim Verfahren mit dem Seilbesen vor allem der zusätzliche Humusabtrag aus. Dies traf dann zu, wenn kein Pflanzenmaterial und keine Feinerde mehr zurückblieben, wie zum Beispiel in Bad Ragaz dank des flachen Randabschlusses.

Falls der Deckbelag wie in Bad Ragaz ca. 5 - 10 cm weniger breit als die darunterliegende Tragschicht eingebracht wird, so wird das ganze Humusmaterial optimal weggewischt; neu anfliegende Samen haben dann schlechte Keimbedingungen.

4. Gesamtdiskussion zu biologischer Wirkung

Die Vegetation der unmittelbar an die Fahrbahn anschliessende Bankettzone kann sich erheblich von jener der Böschung unterscheiden. Regenabfluss, mechanische Belastung, grössere Temperaturschwankungen und geringe Humusaufgabe bilden für die Pflanzen oft sehr feindliche Bedingungen. Durch diese äusseren Einflüsse werden in den oft lückigen Beständen Samenunkräuter, Pionierpflanzen oder ausläuferbildende Arten bevorzugt. Untersuchungen der Strassenrandvegetation zeigen eine grosse Anzahl verschiedener, zum Teil sehr lokal angepasster Pflanzengesellschaften (Klein 1980; Wolff-Straub und Wasner 1981; Wegelin 1984; Schmidt und Stottele 1988; Ullmann et al. 1988; Imbeck 1989; Krause et al. 1989; Ullmann und Heindl 1989; Heindl 1990; Ullmann et al. 1990; Heindl 1992; Daar 1994).

Die Auswahl der geeigneten Bekämpfungsmethode muss auf die im Bankett vorkommenden Arten und deren Wachstumsstadien abgestützt werden. Neben der Artenkenntnis sind zudem Kenntnisse der Entwicklungsbiologie und der Wuchsformen nötig. Ausdauernde Arten mit Regenerationsorganen sind kurz- und mittelfristig praktisch nur mit einem systemischen (in der Pflanze transportierbaren) Blattherbizid nachhaltig bekämpfbar, da thermische und mechanische Methoden hauptsächlich die oberirdische Pflanzenmasse zerstören. Sind aber neugekeimte ausdauernde Pflanzen oder Einjährige ohne Regenerationsorgane zu bekämpfen, so können thermische, mechanische und chemische Methoden erfolgreich angewendet werden.

Soll Pflanzenaufwuchs optimal bekämpft werden, so ist eine Kombination verschiedener Methoden am aussichtsreichsten. Eine mögliche Kombination, unter Berücksichtigung des vorhandenen Pflanzenbewuchses, könnte folgendermassen aussehen:

- Humusansammlungen, welche als Grundlage für das Pflanzenwachstum dienen, mit einer mechanischen Grundreinigung ungefähr im Monat Mai entfernen.
- Wachsen anschliessend mehrjährige pfahlwurzel-, rhizom- oder ausläuferbildende Arten ein oder sind noch solche vorhanden, so können diese mit einem systemischen Blattherbizid erfolgreich beseitigt werden.
- Keimen anschliessend nur Pflanzen aus Samen, so sind thermische, mechanische oder chemische Nachbehandlungen im Jugendstadium geeignet.

Für die Bekämpfung des Pflanzenaufwuchses in der Wasserrinne gelten aus biologischer Sicht grundsätzlich dieselben Empfehlungen wie im Bankettbereich. Umwelt- und gerätetechnische Einschränkungen sind in dieser Übergangszone entscheidende Auswahlparameter für ein Verfahren (siehe auch Teil 3).

5. Zusammenfassung

Jedes Unkrautbekämpfungs-Verfahren veränderte die botanische Zusammensetzung im behandelten Bankettbereich. Die Flora blieb unverändert in Bankettabschnitten, die weiterhin gemäht oder gemulcht wurden (Kontrollen). Somit ist das regelmässige Mähen der Bankette eine zwingende Notwendigkeit zur Erhaltung eines optimalen Pflanzenbewuchses.

An den untersuchten Versuchsstandorten zeigte sich in den ersten 10 - 20 cm des Bankettes ein vielfältiges Bild: Die Versuchsfläche in Bad Ragaz war durch frühere Massnahmen (Herbizideinsatz und bauliche Sanierung der Strecke 1989) etwas heterogener als Wädenswil und Knonau. Die angewendeten Pflegemassnahmen (Schnitthäufigkeit, Liegenlassen oder Absaugen des Schnittgutes), die klimatischen und topographischen Voraussetzungen spielten eine wichtige Rolle für die sich entwickelnde und verändernde Vegetation. In Wädenswil grenzte der grösste Teil der Strecke an einen Wald, was sich in einem tieferen Anteil neukeimender Arten niederschlug. Im lückigen und mageren Bestand von Knonau (ein Schnitt pro Jahr) konnten sich viele vor allem sommerannuelle Samenpflanzen (Therophyten) ansiedeln.

Systemische Blattherbizide und das Abranden hinterliessen nach einer Behandlung einen offenen, kahlen Boden. Neubesiedlungen durch Samenunkräuter war die Folge. Nach der anfänglich sehr guten Wirkung bildete sich je nach Zeitpunkt der Behandlung relativ rasch eine neue Vegetationsdecke. Einwachsende Pflanzen von der Böschung her waren ebenfalls zu beobachten. Die beiden Verfahren waren von ihrem Wirkungsspektrum her unselektiv. Für einen ganzjährigen offenen Boden wären wiederholte Anwendungen nötig. Durch das Abranden mit einem Seilbesen wurde zusätzlich die Humusaufgabe abgetragen, was die Keimung von Samenunkräutern eine Zeitlang unterdrückte.

Die thermischen Verfahren reduzierten mit der gewählten Anzahl Behandlungen die Gesamt-Bodenbedeckung deutlich. Sie töteten Pflanzen ohne Regenerationsorgane ab, was zur Selektion vorwiegend ausläuferbildender Pflanzen führte. Die oft bezeichneten Problemarten wie *Agropyron repens*, *Carex ssp.* oder *Glechoma hederaceum* konnten nicht ausreichend bekämpft werden. Ein vollständiges Aushungern der etablierten Pflanzen und der immer wieder einwachsenden Arten war im Bankett während der drei Versuchsjahre nicht möglich.

Der positive Einfluss der teilweisen Vernichtung des aufliegenden Samens konnte bestätigt werden. Dies schlug sich in einem geringeren Anteil neukeimenden Pflanzen nieder.

Der Einsatz von Bodenherbiziden zur Versiegelung der Bodenoberfläche nach einer Elimination der vorhandenen Pflanzen mit Blattherbiziden verhinderte für einige Zeit das Neuaufleben von Keimlingen. Zwei der drei eingesetzten Bodenherbizide verzögerten bei den gewählten Dosierungen den Wiederaufbau von Pflanzen im Vergleich zur alleinigen Blattherbizid-Anwendung um ca. 2 Monate. Unkrautfreiheit (Bodenbedeckung kleiner als 5%) war mit einer Applikation pro Jahr auf dem Bankett nicht viel länger möglich. Je nach Vegetation im angrenzenden unbehandelten Bankettbereich konnten sich in diesen offenen Flächen teilweise Ausläuferpflanzen ausbreiten.

Erfolgreiche Strategien zur Elimination unerwünschten Pflanzenbewuchses müssen aus Sicht der biologischen Wirksamkeit der einzelnen Bekämpfungsmethoden zukünftig vermehrt auf Kombinationen sinnvoller Massnahmen beruhen. Bei der Auswahl der Methoden spielen die vorhandene Ausgangslage (Pflanzenart, Wachstumsstadien, Wuchsformen) und das angestrebte Ziel eine wesentliche Rolle.

Teil 3 TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE

1. Einleitung

Für den Anwender sind neben der Tatsache, dass eine Methode die gewünschte Wirkung zeigen muss, betriebliche und wirtschaftliche Aspekte genauso entscheidend. Massnahmen, welche arbeitstechnisch oder finanziell für einen Unterhaltungsdienst schwierig zu realisieren sind, haben trotz besserer biologischer Wirkung in der Praxis oft keine Chancen. Nachfolgend werden deshalb technische und wirtschaftliche Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden zusammengestellt und diskutiert.

Die untersuchten Geräte und Methoden sind bezüglich Anwendung und technischer Voraussetzungen zum Teil sehr verschieden. Für alle Methoden gilt jedoch, dass die Behandlungen mit Vorteil von interessiertem, motiviertem und eingearbeitetem Personal ausgeführt werden sollte. Eine genaue Instruktion vor der ersten Inbetriebnahme ist bei allen Methoden unerlässlich.

Die Darstellung der technischen und wirtschaftlichen Aspekte erfolgt in der Reihenfolge chemische, thermische und mechanische Methoden. Falls nötig werden Geräte einzeln besprochen.

2. Material und Methoden

Eine Zusammenstellung der von den Firmen angegebenen technischen Daten der Geräte und Fahrzeuge sind im Teil 2, Kapitel 2 "Material und Methoden" und teilweise im Anhang B beschrieben. Die erhobenen Daten und die berechneten Resultate basieren alle auf den in Teil 2 beschriebenen Versuchen. Sie sind zusammen mit weiteren grundlegenden Annahmen und Schätzwerten aus der Literatur in Anhang B aufgeführt.

3. Resultate und Diskussion

3.1 Betriebliche Störungen

Alle Methoden ausser den zwei mechanischen Vorsorgemassnahmen (Abranden mit Pflug oder Unkrautbesen mit Seilbesen) konnten ohne Sperrung einer Fahrbahn angewendet werden. Bei einer möglichen Verkehrsbehinderung durch die beiden mechanischen Verfahren spielten die Behandlungsgeschwindigkeit und die Anzahl Behandlungen pro Jahr eine entscheidende Rolle.

Für die Behandlung des Mittelstreifens muss im Gegensatz zum seitlichen Bankett bei allen Verfahren mindestens die Überholspur gesperrt werden.

Das mechanische Verfahren mit dem Flachstahlbesen und die thermischen Methoden sind bei einer allfälligen Behandlung des Mittelstreifens bezüglich Betriebsstörungen nicht optimal. Der Grund liegt bei der benötigten Anzahl Durchgänge bzw. der relativ niedrigen Arbeitsgeschwindigkeit.

Die entstehenden minimalen Behinderungszeiten jeder Methode pro Kilometer und Jahr sind in Tabelle 11 aufgeführt.

3.2 Vorsichtsmassnahmen und Sicherheit

Unabhängig von der verwendeten Methode bedeutet eine längere Aufenthaltszeit am Strassenrand ein erhöhtes Unfallrisiko für das Personal und die Verkehrsteilnehmer. Aus sicherheitstechnischen Gründen sind deshalb Verfahren mit möglichst wenigen Anwendungen pro Jahr und kurzen Behandlungszeiten zu bevorzugen.

Herbizide: Bei der Lagerung und Verwendung von Pflanzenbehandlungsmitteln müssen allgemeine und auf der Packung angegebene produktespezifische Vorsichtsmassnahmen getroffen werden, um die Exposition des Anwenders zu minimieren. Diese Massnahmen sind je nach Giftklassen-Einteilung des Produkts verschieden. Auch bei der Ausbringung der Stoffe müssen alle zweckdienlichen Schutzmassnahmen getroffen werden, um Mensch, Tier und Umwelt zu schützen (FAW 1994).

Gemäss Stoffverordnung (StoV) dürfen Pflanzenbehandlungsmittel (PBM) nur unter Anleitung von Fachleuten berufsmässig ausgebracht werden, die im Besitz einer Fachbewilligung sind. Seit dem 1. Juli 1993 ist die ergänzende Verordnung des Eidgenössischen Departements des Innern in Kraft, die den Erwerb von Fachbewilligungen für "spezielle" Bereiche regelt (Unterhalt von Bahnanlagen, Strassen, Plätzen etc.). Danach benötigt jede Person, die PBM *ohne* Anleitung beruflich oder gewerbsmässig verwendet, ab 31. Dezember 1996 eine Fachbewilligung. Ausgenommen ist die Behandlung einzelner Pflanzen mit einem handbetriebenen Gerät. Mit der Fachbewilligung wird ein Mindest-Wissen erworben über die mögliche Gefährdung von Mensch und Umwelt sowie über einen optimalen Einsatz von PBM zur Reduktion dieser Gefährdung.

Der Applikation von Herbiziden in den Wasserrinnen muss besondere Beachtung geschenkt werden. Mögliche Abtrift auf Randstein und Belag können eine Gefährdung für das Oberflächenwasser bedeuten und sind gemäss StoV nicht erlaubt ("Auf und an National- und Kantonsstrassen dürfen PBM nicht vorbeugend, nicht auf Hartbelägen und nicht im Fassungsbereich von Grundwasserschutzzonen (Zone S1) verwendet werden." StoV, Anhang 4.3 Art. 3, Absatz 5). Die geringe Adsorption der Wirkstoffe auf der befestigten Fläche und allfälliger Oberflächenabfluss stellen diesbezüglich Risikofaktoren dar.

Die Herbizide wurden mittels Rückenspritzen oder einer auf einem Trägerfahrzeug installierten Motorspritze ausgebracht. Dazu war dank des Pannestreifens keine besondere Signalisation nötig; für den Mittelstreifen ist eine mobile Sperrung einer Fahrbahn unumgänglich. Die gesamte Aufenthaltszeit an der Strasse pro Jahr und Kilometer und somit die potentielle Gefährdung war relativ gering (Tab. 11).

Thermische Verfahren: Die thermischen Geräte wurden in den vorliegenden Untersuchungen mit Propangas betrieben. Die Entnahme aus den handelsüblichen 11 kg Gasflaschen erfolgte in der Flüssigphase. Wie bei PBM existieren für Flüssiggase Sicherheitsvorschriften bezüglich Verwendung, Lagerung und Transport (SUVA 1989; EKAS 1990; SUVA 1994).

Während der dreijährigen Versuchsphase entstanden keine Probleme bezüglich der Verwendung von Flüssiggas. Alle Geräte entsprachen den landesüblichen Sicherheitsvorschriften.

Bei grossflächigem Einsatz von thermischen Geräten wären spezielle Schutzmassnahmen für den Transport nötig, da Gas für mindestens einen Arbeitstag (max. 200 kg) mitgeführt werden müsste. Das Mitführen von grösseren Mengen erhöht das Gefahrenrisiko auf der Strasse. Entscheidend für das relativ hohe Unfallrisiko der thermischen Verfahren sind aber die langen Aufenthaltszeiten an den Strassen, bedingt durch die Anzahl der Behandlungen (Tab. 11). Weiter können gewisse Gefahren durch eine vorschriftswidrige Handhabung auftreten, was aber im Prinzip für alle Verfahren gilt. Wie bei den chemischen Mitteln ist auch hier die Sperrung einer Fahrbahn bei den Arbeiten im Mittelstreifen notwendig.

Tabelle 11: Jährliche Aufenthaltszeiten auf der Standspur sowie Mindestdauer von Betriebsstörungen bei einer Unkrautbehandlungs-Massnahme im Mittelstreifen.

	Personen	Behandlungen pro Jahr	Arbeitsgeschwindigkeit [km/h]	Sicherheit: Jährl. Aufenthaltszeit des Personals auf der Standspur [Min./km*J]	Betriebsstörung: Minstdauer einer Verkehrsstörung im Mittelstreifen [Min./km*J]
Rückenspritze	1	2	4	30	30
Motorspritze	2	2	4	60	30
Thermische Geräte	2	4	3	160	80
Flachstahlbesen	1	3	1.1	164	164
Seilbesen	4	1/3	0.7	115	29
Abranden mit Pflug inkl. Aufnahme	6	1/4	0.8	113	19

Mechanische Verfahren: Zur Behandlung der Wasserrinne mit dem Flachstahlbesen an einer Strassenkehrmaschine waren keine zusätzlichen Fahrzeuge und keine spezielle Signalisation nötig. Obwohl nur eine Person die ganze Arbeit durchführen konnte, war die Aufenthaltszeit am höchsten (Tab. 11), bedingt durch die drei benötigten Behandlungen und die tiefe Arbeitsgeschwindigkeit.

Bei den Verfahren mit dem Seilbesen und dem Abrandpflug war zur Sicherheit der beteiligten Personen eine zusätzliche Signalisation notwendig. Zusätzlich zum erhöhten Aufwand für diese Signalisation waren für diese Verfahren mehrere Fahrzeuge und Personen im Einsatz, was wiederum das Unfallrisiko erhöhte (Tab. 11).

In der Anwendung mussten für die mechanischen Geräte keine besonderen Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden. Für unbeteiligte Fahrzeuge bestand durch weggeschleuderte Steine ein gewisses Risiko, das aber durch eine optimale Einstellung der Geräte minimiert werden konnte.

3.3 Arbeitskräfte und Zeitaufwand

Die benötigten Anzahl Arbeitskräfte und der Zeitbedarf einer Methode sind zwei wichtige Parameter beim Vergleich der Verfahren. Die erforderliche Anzahl Personen und Fahrzeuge wirkten sich entscheidend auf die Gesamtkosten aus, da zum Teil für Sicherheitsvorkehrungen und Abtransport von Wisch- und Abbrandmaterial zusätzliche Arbeitskräfte nötig waren. Für einen objektiven Vergleich der Verfahren müssen verschiedene Phasen des Arbeitsablaufes unterschieden werden. Materialabtransport und Signalisation sind hier noch nicht enthalten; dies wird bei den relevanten Verfahren besprochen.

1. Vorbereitungsphase im Werkhof (An- und Abbau der Geräte, Spritzbrühevorbereitung, vgl. Tab. 12)
2. Hin- und Rückfahrt zum resp. vom Einsatzort
3. Vorbereitung am Einsatzort: Erstellen der Betriebs- resp. der Transportbereitschaft
4. Durchführung der Behandlung an der Strasse

Die Punkte zwei und drei waren bei allen Methoden ungefähr gleich aufwendig; die Hin- und Rückfahrt war vom gewählten Fahrzeug abhängig, und die Vorbereitungszeit am Einsatzort betrug eine bis fünf Minuten.

Tabelle 12: Zeit-, Arbeitskräftebedarf (AK) und Arbeitskraftstunden (AKh) für die Vorbereitung der Geräte im Werkhof (Erstellen der Betriebsbereitschaft und der Sicherheitsvorkehrungen zur Hinfahrt) sowie für die Demontage im Werkhof.

	Geräte schon am Trägerfahrzeug		Geräte nicht am Trägerfahrzeug		Demontage und Reinigung der Geräte	
	AK	totale AKh [Min]	AK	totale AKh [Min]	AK	totale AKh [Min]
Rückenspritze	1	30	1	30	1	30
Motorspritze	1	30	2	80	1	50
Thermische Geräte	1	10	2	80	1	30
Flachstahlbesen	1	10	1	40	1	15
Seilbesen	1	10	2	80	1	15
Abbranden mit Pflug inkl. Aufnahme	1	10	2	80	1	30

Herbizide: Bei den chemischen Verfahren fiel die Zubereitung der Spritzbrühe unter die Vorbereitungszeit. Zwar konnte dies eine Person allein bewerkstelligen, trotzdem war dadurch die Vorbereitungszeit länger als bei den anderen, schon am Trägerfahrzeug montierten Geräte (Tab. 12). Mit der Motorspritze konnten je nach Grösse des Wassertankes mit einer Füllung von z.B. 500 l ca. 40 km einseitig behandelt werden (500 l/ha Spritzbrühe und 0.25 m Behandlungsbreite). Mit einer Rückenspritze à 25 l müsste bei gleicher Spritztechnik jeweils nach ca. 2 km neue Brühe gemischt werden. Zu beachten ist allerdings, dass mit beiden Geräten bei punktuellen Behandlungen oder mit der Applikation höher konzentrierter Spritzbrühen bei gleicher Wirkstoffmenge pro Fläche der Aktionsbereich entsprechend erhöht würde.

Thermische Verfahren: Die Vorbereitungszeit der thermischen Geräte im Werkhof (Anbau, Erstellen der Betriebsbereitschaft) betrug zwischen 40 und 60 Minuten. Durch optimale Anpassung an das Trägerfahrzeug könnte diese Zeit halbiert werden. Mit Vorteil wurden zum Anbau der Geräte auf dem Werkhof zwei Personen eingesetzt. Waren die Geräte schon angebaut, war die Vorbereitungszeit minimal (Tab. 12). Die eigentliche Behandlung konnte mit zwei Personen durchgeführt werden (Tab. 13). Ohne Brandgefahr und mit optimal auf das Trägerfahrzeug (kein Unimog) abgestimmtem Gerät, könnte eine Behandlung allenfalls auch mit einer Person durchgeführt werden. An einem Arbeitstag (6 Stunden Bearbeitungszeit) könnten bei einer durchschnittlichen Arbeitsgeschwindigkeit von 3 km/h einseitig 18 km behandelt werden. Dazu würden je nach Gerät 80 -140 kg Gas benötigt. Bei noch grösseren Streckenabschnitten wäre zu beachten, dass der Zeitbedarf für das Management der Gaszufuhr hinzukäme.

Mechanische Verfahren: Eine Neumontage der mechanischen Geräte im Werkhof dauerte ebenfalls ca. 40 - 60 Minuten. Sofern die Geräte schon am Trägerfahrzeug montiert waren, konnten sie durch eine Person in 5 - 10 Minuten betriebsbereit eingestellt werden (Tab. 12).

Im eigentlichen Einsatz konnten alle Geräte (ausser Motorspritze) durch eine Person bedient werden. Die thermischen und vor allem die mechanischen Geräte mussten durch den Fahrer sehr genau überwacht werden, um eine optimale Wirkung zu erzielen. Somit waren die Anforderungen an das Bedienungspersonal recht hoch. Je nach Methode wurden zusätzliche Arbeitskräfte für weitere Aufgaben während des Arbeitsgangs benötigt.

Wie im vorangehenden Kapitel erwähnt, brauchte es beim Abranden mit einem Seilbesen einen zusätzlichen Arbeitsgang zur Reinigung der Strasse. Dies war auch mit dem Abrandpflug notwendig, obwohl die Erdschollen direkt auf einen Lastwagen befördert wurden. Durch die Signalisation und die zusätzlich benötigten Personen und Fahrzeuge waren diese zwei Methoden sehr arbeitsintensiv (Tab. 13).

Tabelle 13: Anzahl benötigter Arbeitskräfte und Fahrzeuge der verschiedenen Unkrautbekämpfungsmethoden im seitlichen Bankettbereich, falls notwendig inkl. einer minimalen mobilen Signalisation.

	totale Anzahl Arbeitskräfte	totale Anzahl Fahrzeuge	Fahrzeugtyp	Signali- sation
Rückenspritze	1	1	Auto	Nein
Motorspritze	2	1	Unimog	Nein
Thermische Geräte	2	1	Unimog	Nein
Flachstahlbesen	1	1	Kehrmaschine	Nein
Seilbesen	4	4	Kleinfahrzeug, Kehrmaschine, Unimog, Auto	Ja
Abranden mit Pflug inkl. Aufnahme	6	6	Kleinfahrzeug, 2 Lastwagen, Kehrmaschine, Unimog, Auto	Ja

3.4 Material- und Energieaufwand

Die Darstellung von Material- und Energieaufwand befindet sich bei der ökologischen Bewertung der Verfahren weiter hinten. Es werden nur die für die Kostenrechnung relevanten Daten dargestellt.

Entscheidend für den Gesamtenergieverbrauch in allen Verfahren waren die eingesetzten Fahrzeuge, die nötige Anzahl Behandlungen und die Arbeitsgeschwindigkeit. Für die thermischen Verfahren war der Gasverbrauch eine weitere Hauptkomponente des Energieaufwandes.

Das Abflamngerät verbrauchte 12.7 kg/h Propangas, der verwendete Prototyp des Infrarotgerätes benötigte 21.4 kg/h. Am Gesamtenergieverbrauch machte das Propangas ca. 70 % aus (umgerechnet auf gleiche Arbeitsbreite beider Geräte).

Für die zwei mechanischen Varianten wurde zusätzlich zum Energieverbrauch auch die Abnutzung der Werkzeuge erhoben. Die kurzen Einsatzzeiten der Geräte auf den Versuchsstrecken liessen keine fundierten Aussage über die Lebensdauer zu. Für die weiteren Berechnungen musste deshalb auf Firmenangaben und Erfahrungen aus der Praxis zurückgegriffen werden.

In Tabelle 14 sind der durchschnittliche Energie- und Arbeitsaufwand der 500 m langen Teststrecken zusammengestellt. Alle Resultate sowie die klimatischen und versuchsspezifischen Rahmenbedingungen der einzelnen Behandlungen sind in Anhang B aufgeführt.

Tabelle 14: Durchschnittlicher Arbeitszeit-, Material- und Propangas-Input der chemischen, thermischen und mechanischen Verfahren auf einer 500 m langen Teststrecke an der N3 bei Thalwil während der Versuchsdauer von 1992 bis 1994 (Mittelwerte $\pm$ Standardfehler). Die effektiven Arbeitsbreiten waren gerätespezifisch und sind in Klammer angegeben.

	Geschwindigkeit [km/h]	Gasverbrauch [kg/h]	Wasserverbrauch [kg/h]	Humusabtrag [m ³ /km]
Rückenspritze (ca. 0.25 m)	≈ 4.0	-	≈ 12.5	-
Motorspritze (ca. 0.25 m)	≈ 4.0	-	≈ 12.5	-
Infrarotgerät (ca. 0.70 m)	1.7 ± 0.3	21.4 ± 1.6	-	-
Abflamngerät (ca. 0.40 m)	1.6 ± 0.1	12.7 ± 0.6	-	-
Flachstahlbesen (ca. 5 cm)	1.1 ± 0.1	-	101 ± 47	< 0.1
Seilbesen (ca. 0.15 m)	0.7 ± 0.1	-	119 ± 89	1.6 ± 0.2

3.5 Leistung

Die Herbizidapplikation war mit handbetriebenen und motorisierten Geräten die schnellste Methode (4km/h, Tab. 14). Die Anwendung der Blattherbizide kann jedoch grundsätzlich nur auf trockene Pflanzen erfolgen und bedingt nachfolgend 4 Stunden trockene Witterung. Starker Wind ist wegen möglicher Abtrift ebenfalls ungünstig. Somit ergeben sich bezüglich der möglichen Termine Einschränkungen.

Die chemischen Verfahren mit einem Spritzstock könnten ohne weiteres Arbeitsbreiten von einem Meter abdecken, was aber in unseren Versuchen nicht erwünscht war.

Die durchschnittliche Arbeitsgeschwindigkeit der thermischen Geräte betrug während der drei Versuchsjahre ca. 1.7 km/h. Unter optimalen Witterungsbedingungen konnten auch höhere Geschwindigkeiten erzielt werden. Waren die Pflanzen noch nass, oder regnete es leicht, verringerte sich die Geschwindigkeit auf ca. 1 km/h und die biologische Wirkung war weniger gut, da in der Wasserrinne oft stehendes Wasser lag, das die Pflanzen schützte (Tab 14 und Anhang B).

Die Arbeitsgeschwindigkeit wurde entsprechend dem Pflanzenbewuchs und der durchgeführten "Fingerdruckprobe" gewählt. Anfänglich wurde mit Geschwindigkeiten von gegen 3 km/h gearbeitet, die Wirkung in unseren Pflanzenbeständen war aber zu wenig nachhaltig, im ersten Jahr konnte bereits nach ca. 8 Tagen wieder ein nachstossen der Gräser beobachtet werden. Da der verbleibende Pflanzenbestand relativ schwer zu bekämpfen und die Wirkung nicht anhaltend war, wurden die Geschwindigkeiten reduziert. Trotz der gewählten Behandlungsart (Anzahl Behandlungen und Geschwindigkeit) konnten nicht alle Pflanzen eliminiert werden. Somit stellte sich die Frage, ob allenfalls grössere Geschwindigkeiten und eine höhere oder gleichbleibende Anzahl Behandlungen eine ähnliche Wirkung gezeigt hätten? Laut Firmenangaben sollten Geschwindigkeiten zwischen 2 - 5 km/h erreicht werden können (Tab. 4 und 5). Versuche von Ascard (1995) zeigen, dass bei jungen *Brassica napus* Pflanzen im 3-Blattstadium und einer Geschwindigkeit von mehr als 4 km/h eine Verschlechterung der Wirkung eintrat; für *Sinapsis alba* im 6-Blattstadium bereits ab 2 - 3 km/h. Somit lagen unsere Geschwindigkeiten für einen etablierten Pflanzenbestand mit 1.5 bis 2 km/h sicher im Rahmen. Strebt man eine Bekämpfung im Jugendstadium an, was von der Methode her am sinnvollsten wäre, so könnten wahrscheinlich Geschwindigkeiten um 3 km/h erreicht werden. Je nach Wachstumsbedingungen müssten aber die Behandlungsintervalle angepasst werden.

Die zwei thermischen Geräte hatten unterschiedliche Gerätebreiten: das Infrarotgerät ca. 0.8 m, das Abflamngerät ca. 0.4 m. Mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von ca. 1.7 km/h ergibt dies eine Flächenleistung von ca. 1360 m² resp. 680 m² pro Stunde. Diese unterschiedliche Arbeitsbreiten wurden bei der ökologischen Bewertung berücksichtigt, jedoch nicht bei der betrieblichen und wirtschaftlichen Gegenüberstellung.

Der Propangasverbrauch der Geräte muss optimal auf den Pflanzenbewuchs abgestimmt werden, damit nicht unnötige Wärme produziert wird. Die verwendeten Strassenrandgeräte benötigten 160 - 190 kg Gas pro Hektare. Gemäss Untersuchungen von Ascard (1995) nahm die Wirkung auf junge *Brassica napus* und *Sinapsis alba* Pflanzen bei einem Gasverbrauch unter 30 - 80 kg/ha rasch ab. Da am Strassenrand oft verschiedene Verhältnisse vorherrschen und nicht nur Jungpflanzen zu bekämpfen waren, ist ein höherer Gas-Input pro Fläche nötig; ob dieser 2 - 3 mal so hoch sein muss wie im Feldbau, müsste noch überprüft werden.

Als Kompromiss für die weiteren Kostenberechnungen und die Ökobilanzierung wurde eine Geschwindigkeit von 3 km/h, vier Behandlungen pro Jahr und die effektiv gemessenen Gasmengen verwendet.

Die mechanischen Geräte waren im Einsatz weniger stark von der Witterung abhängig. Optimale Bedingungen waren leicht feuchter Boden ohne Niederschläge (geringe Staubentwicklung, kein Wasserverbrauch, Pflanzen leichter wegwischtbar und keine Verschlämmung). Die mittlere Geschwindigkeit mit dem Flachstahlbesen betrug 1.1 km/h. Die Behandlung des Bankettes mit dem Drahtseilbesen konnte mit einer Geschwindigkeit von 0.7 km/h durchgeführt werden (Tab. 14).

Eine analoge Flächenleistung für die mechanischen Geräte wurde nicht berechnet. Die Versuche und die entsprechenden Geräte waren für die Behandlung der Wasserrinne oder eines schmalen Bankettstreifens ausgelegt. Für Flächenbehandlungen existieren auf dem Markt geeignete Geräte.

3.6 Vergleich der Methoden

3.6.1 Kosten

Die Kostenberechnungen wurden gemäss Angaben von Firmen und Kostenmodellen aus der Landwirtschaft durchgeführt (FAT 1994). Die Stundenansätze für Arbeitskräfte (Fr. 50.–) und für Fahrzeuge (Unimog Fr. 50.–, Lastwagen Fr. 80.–, beide ohne Fahrer) wurden bewusst tief angesetzt, in der Annahme, dass festangestellte Arbeitskräfte auch für weiteren Aufgaben im Grünpflegebereich eingesetzt werden. Stundenansätze von Lohnunternehmungen können höher liegen.

Die verwendeten Kostenelemente zur Berechnung der jährlichen Kosten für die Geräte und Methoden sind im Anhang B und in Tabelle 15 aufgeführt.

Einem ersten Vergleich wurde ein Modellwerkhof mit 75 km Strasse zugrundegelegt. Werden in diesem Modell die Bankette beider Strassenseiten zu 100 % behandelt, ergibt dies eine jährliche Behandlungsstrecke von 150 km. Die Geräte zur Unkrautbekämpfung sind im Modell gekauft und müssen amortisiert werden. Die jährliche Auslastung der Geräte ergibt sich aus der benötigten Anzahl Behandlungen, der Arbeitsgeschwindigkeit und den 150 km zu behandelnden Strassenbanketten.

Wird nun die ganze Strecke entsprechend den vorliegenden Versuchserfahrungen mit einem Gerät und dem dazu benötigten Personal und Fahrzeugen behandelt (Tab. 13), entstehen folgende jährliche Mindestkosten pro Kilometer (Tab. 15a und b).

*Tabelle 15a: Zusammenfassung der ungefähren jährlichen Behandlungskosten [Fr./km * Jahr] bzw. der Kosten einer einzelnen Behandlung [Fr./km] verschiedener Verfahren zur Unkrautregulierung an Strassen (Berechnung und zugrundeliegende Daten siehe Tab. 15b und Anhang B)*

Verfahren	Kosten pro Jahr [Fr./km * Jahr]	Kosten pro Behandlung [Fr./km]
chemisch	100.–	50.–
thermisch	250.–	60.–
mechanisch:		
Drahtseilbesen ohne Deponiekosten	220.–	670.–
Abranden mit Pflug ohne Deponiekosten	330.–	1'300.–
Flachstahlbesen, nur Wasserrinne	370.–	125.–

Tabelle 15b:

Kostenberechnung der chemischen, thermischen und mechanischen Methoden anhand eines Modellwerkhofes mit jährlich 150 km zu behandelnden Strassenbanketten. Um einen objektiven Vergleich zu erhalten, wurden Berechnungen und Entschädigungsansätze bei allen Methoden gleich gewählt, in der Praxis könnten dadurch Abweichungen entstehen. Beschreibung der Verfahren vgl. Teil 2 (Legende und Bsp. mit 300 km jährlich zu behandelnden Strassenbanketten im Anhang B).

Einheit	chemisch		thermisch		mechanisch		Flachstahl-		Kehr-		Unimog	
	Motor-	Rücken-	Infra-	Abflammen	Self-	Abbrand &	Leitplanken-	besen	maschine	U-2100	U-90	U-90
	spritze	spritze	rot		besen	Aufnahme	mähwerk					
Grundkosten												
total pro Jahr	1371	129	1680	2493	3060	13684	5140	1749	28900	34282	20803	
pro km und Jahr	9	0,9	11	17	20	91	34	12				
pro km (1 Behandlung)	5	0,4	3	4	61	365	11	4				
pro Einsatzstunde	18	1,7	8	12	43	292	57	4	29	34	21	
* Abschreibungsdauer	12	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
* Raumbedarf	20	3	15	15	15	77	50	15	65	65	50	
* Anschaffungspreis (ohne Montage)	8000	500	10000	15990	20000	88000	30000	10500	200000	239000	143500	
1. Abschreibung	667	50	1000	1589	2000	8800	3000	1050	20000	23900	14350	
2. Kapitalzins	288	18	360	572	720	3168	1080	378	7200	8604	5166	
3. Versicherungen & Gebühren	16	1	20	32	40	176	60	21	400	478	287	
4. Gebäudekosten	400	60	300	300	300	1540	1000	300	1300	1300	1000	
Gebrauchskosten												
total pro Jahr	3200	2905	6136	4637	3256	5374	7125	4443	19200	26340	15810	
pro km und Jahr	21	19	41	31	22	36	48	30				
pro km (1 Behandlung)	11	10	10	8	65	143	16	10				
pro Einsatzstunde	43	39	31	23	46	115	79	10	19	26	16	
* Ø Bearbeitungszeit	4	4	3	3	0,7	0,8	5	1				
* Ø Anzahl Behandlungen pro Jahr	2	2	4	4	0,33	0,25	3	3				
* Unterhaltsstrecke pro Werkhof	150	150	150	150	150	150	150	150				
* effektiv behandelte Strecke	300	300	600	600	50	38	450	450	0	0	0	
* jährliche Auslastung	75	75	200	200	71	47	90	450	1000	1000	1000	
* Gasverbrauch			21,4	12,7	50	100	200	50	600	1000	600	
* Benzinverbrauch	8,00	8,00										
* Herbizidverbrauch												
* Kosten pro Verbrauchs-Einheit	30	30	1,2	1,2	880	200	500	377	120	120	120	
1. Reparatur & Wartung	320	25	1000	1589	2000	5280	3000	1050	12000	14340	8610	
2. Energie- u. Verschleißkosten	2880	2880	5136	3048	1256	94	225	3393	7200	12000	7200	
3. Spezialles: Entsorgung							3900					
Gesamtkosten für Gerät (Effektive Auslastung auf einem Werkhof mit 76km mal 2 Strassenseiten)												
total pro Jahr	4571	3034	7816	7130	6316	19058	12265	6192	48100	60622	36613	
pro km und Jahr	30	20	52	48	42	127	82	41				
pro km (1 Behandlung)	15	10	13	12	126	508	27	14				
pro Einsatzstunde	61	40	39	36	89	407	136	14	48	61	37	
Entschädigungsansätze												
Anzahl Personen	2	1	2	2	4	6	1	1	Arbeiter		50	
Fahrzeuge total	1	1	1	1	4	6	1	1				
Unimog	1	0	1	1	1	1	1	0	Unimog		50	
Kehrmaschine (60kW)	0	0	0	0	0	0	0	0	Kehrmaschine (60kW)		60	
Kehrmaschine (170kW)	0	0	0	0	0	0	0	0	Kehrmaschine (170kW)		80	
Traktor (4-Radantrieb, 60kW)	0	0	0	0	0	0	0	0	Traktor (4-Rad, 60kW)		40	
Pony	0	0	0	0	0	0	0	0	Pony		50	
Lastwagen	0	0	0	0	0	2	0	0	Lastwagen		80	
Bus/Auto	0	1	0	0	1	1	0	0	Bus/Auto		20	
Gesamtkosten Methode (Gerät, Fahrzeuge, Arbeiter, falls nötig inkl. minimaler mobiler Signalisation)												
total pro Jahr	15821	8284	37816	37130	33432	49058	21265	55692				
pro km und Jahr	105	55	252	248	223	327	142	371				
pro km (1 Behandlung)	53	28	63	62	669	1308	47	124				
pro Einsatzstunde	211	110	189	186	469	1047	236	124				
theoretische Wirkungsbreite	1,00	1,00	0,70	0,35	0,20	0,20	1,10					
{pro m2 und Jahr}	0,11	0,06	0,36	0,71	1,11	1,64	0,13					
{pro m2 (1 Behandlung)}	0,05	0,03	0,09	0,18	3,35	6,54	0,04					

Durch einen gemeinsamen Maschineneinsatz verschiedener Unterhaltsdienste kann die Geräteauslastung erhöht werden. Bei einer Verdoppelung reduzieren sich die Kosten um 5 - 10 % (Tab. B-8, Anhang B). Das relativ teure Abrandgerät mit Aufnahmevorrichtung wird bei einer besseren Auslastung (ca. 75 km pro Jahr anstelle der oben angenommenen 38 km/Jahr) sogar bis zu 20 % billiger.

Wie auch beim Energieverbrauch sind in der Kostenrechnung die Arbeitsgeschwindigkeit und die jährlichen Anzahl Behandlungen eines Verfahrens entscheidend.

3.6.2 Technische und betriebliche Aspekte

Herbizide: Die Applikation mit einem manuell geführten Spritzstock und stufenlos einstellbaren Druck bietet sehr viele Vorteile. Spritzfläche und -menge können so optimal an jede Veränderung der Vegetation angepasst werden. Schlecht zugängliche Stellen und Punktbehandlungen sind kein Problem. Der relativ kleine Aktionsradius mit einer Rückenspritze bietet in der Praxis bei der Verwendung von Glyphosate keine Nachteile. Die eingesetzte Menge Glyphosate kann bei gleichwertiger oder sogar besserer biologischer Wirksamkeit auch mit 50 - 100 l Wasser pro Hektare (anstelle 500 l/ha) ausgebracht werden (Grossbard und Atkinson 1985; Müller 1993). Mit 25 l dieser konzentrierten Spritzbrühe können 10 bis 20 Kilometer 0.25 m breit behandelt werden. Werden Herbizide punktuell eingesetzt, so ist eine genaue Berechnung der benötigten Spritzmenge enorm schwierig; um Reste zu vermeiden, sollten darum nur kleine Mengen angerührt werden.

Die thermischen Geräte haben ein Steuergerät im Führerstand, womit die Zündung der Brenner, die Höhen- und Randanpassung gesteuert werden. Für die Einstellung der Arbeitshöhe wird beim Abflammgerät eine Stützrolle verwendet. Dies ist für den Einsatz am Strassenrand gut geeignet, könnte aber auf anderen Oberflächen Probleme bieten.

Die gewinkelte Konstruktion des Infrarotgerätes mit besserer Wärmeabstrahlung in die Rinne ist zwar für hohe Randabschlüsse geeignet (z.B. innerorts), zeigt aber bei normal flachen Banketten einige Nachteile. Der Grund liegt darin, dass der relativ grosse Raum zwischen Infrarotgitter und Boden einen grösseren seitlichen Wärmeverlust zur Folge hat.

Die mechanischen Geräte werden ausschliesslich über das Hydrauliksystem bedient. Das Gerät mit Drahtseilbesen braucht für eine optimale Ausnutzung des Arbeitspotentials eine Oelförderleistung von 40 l/Min. (resp. 60 l/Min. für das grössere Gerät). Kleinere Kehrmaschinen stossen damit im kombinierten Reinigungseinsatz ohne zusätzliche Oelförderpumpe an ihre Grenzen. Für die intensive Überwachung der Bürsten ist ein Anbau dieser Geräte an Fahrzeuge mit grosszügiger Fahrersicht von Vorteil.

Ein optimaler Anbau der Geräte an die Trägerfahrzeuge ist für den späteren Einsatz wichtig. Bei den durchgeführten Untersuchungen war jede Firma bereit, die entsprechenden Anpassungen ihrer Geräte an die Trägerfahrzeuge der Werkhöfe vorzunehmen.

Alle physikalischen Geräte benötigen eine Hubvorrichtung am Fahrzeug. Ist diese nicht vorhanden, müssen die Geräte mit einer zusätzlichen Hubvorrichtung installiert werden. Beim Unimog des Autobahnwerkhofes muss technisch aufwendig zusätzlich eine VSS-Normplatte mit einer Hubvorrichtung versehen werden. Mit

dieser Lösung ist aber die ausreichende Sicht des Fahrers auf die ganze Arbeitsfläche der Geräte nicht mehr gewährleistet.

Die Bodenanpassung während der Arbeit erfolgt elektrisch oder hydraulisch. Für die Bedienung der Geräte ist es von Vorteil, wenn die gesamte Steuerung entweder mittels Hydrauliksystem oder durch eine rein elektrische Lenkung erfolgt. Kombinationen sind für den Anwender tendenziell schwieriger zu bedienen.

4. Gesamtdiskussion der technischen und wirtschaftlichen Aspekte

In den vorliegenden Versuchen wurde die Eignung der Verfahren bezüglich biologischer Wirksamkeit erweitert um arbeitstechnische und ökonomische Aspekte. Dabei werden die Verfahren einzeln betrachtet, Kombinationen wurden nicht untersucht.

Die angestrebte Zielsetzung und die vorhandenen Rahmenbedingungen entscheiden primär über die Auswahl der Methode. Betriebliche Abläufe und ökonomische Aspekte sind dann weitere wesentliche Entscheidungskriterien für oder gegen den Einsatz einer Methode. Somit ergibt sich ansatzweise das folgende Entscheidungsmodell:

1. Wie ist die vorhandene Ausgangssituation?
2. Welche Zielvorstellung ergibt sich für diese Situation?
3. Welche Methoden sind geeignet zur Realisierung der Zielvorstellung?
4. Sprechen die betrieblichen, arbeitswirtschaftlichen und finanziellen Rahmenbedingungen deutlich zugunsten eines Verfahrens? Sind allenfalls kombinierte Verfahren einsetzbar?
5. Wie sind die einsetzbaren Verfahren ökologisch zu bewerten?

Die Ausgangssituation und die Zielvorstellungen können sehr vielfältig sein. Dazu weitere Überlegungen in den Teilen 5 und 6.

Zuerst zu den **Einsatzmöglichkeiten** der verschiedenen Methoden (Frage 3):

Die Herbizidapplikation muss differenziert betrachtet werden. Wird ein Blattherbizid mit einer Rückenspritze eingesetzt, so sind die Einsatzmöglichkeiten einzig durch die Sorgfalt der ausführenden Person beschränkt. Insbesondere auf befestigten Flächen, wo eine Kontamination des Hartbelages verhindert werden muss, ist die Gewissenhaftigkeit und Sorgfalt des Anwenders entscheidend. Ansonsten kann mit dieser Applikationsmethode einzelpflanzenweise oder flächig Bewuchs auf allen Flächen bekämpft werden, unabhängig vom Randabschluss. Auch Einzelpflanzen in angrenzenden Böschungen können gezielt mitbehandelt werden. Mit der Motorspritze können - wenn auch weniger gezielt als mit der Rückenspritze - ebenfalls unabhängig vom Randabschluss praktisch alle Situationen abgedeckt werden.

Thermische Geräte können neben befestigten Flächen auf Kies- und Schotterflächen eingesetzt werden und sind ebenfalls praktisch unabhängig vom vorhandenen Randabschluss.

Mechanische Verfahren werden dagegen mit Vorteil nur auf befestigten Asphalt- und Betonflächen verwendet. Je nach Randabschluss müssen verschiedene Besen eingesetzt werden (Seilstruppen bei flachem Abschluss; Flachstahlstruppen bei Stellplatten). Infolge der oft wechselnden Randabschlüsse ist in der Praxis eine Kombination der beiden Besentypen von Vorteil. Dazu bieten einige Hersteller bereits Geräte

mit zwei rotierenden Besen an. Der erste Besen mit Seilborsten dient zur Behandlung des Randsteins und der zweite mit Flachstahlborsten zur gezielten Unkrautbekämpfung in der Rinne. Allerdings wird es im kombinierten Einsatz mit der Strassenreinigung immer schwieriger, alle Arbeitsgeräte zu überwachen.

Die Analyse der einzelnen Komponenten der gesamthaft anfallenden Arbeitskraftstunden (AKh) zeigt, dass die Vorbereitungszeiten der Methoden nicht ins Gewicht fielen. Die entscheidenden Grössen sind dagegen die Anzahl benötigter Arbeitskräfte, die möglichen Arbeitsgeschwindigkeiten und die Anzahl Behandlungen pro Jahr. Die arbeitswirtschaftlich grössten Einsparungen sind somit bei diesen drei Grössen zu erwarten. Dazu würden beitragen: Schmale Geräte und Fahrzeuge, damit keine Fahrbahnspernung nötig wird; bessere Wirkungsweise, damit die Geschwindigkeit erhöht und die Anzahl Behandlungen verringert werden kann. Einen entscheidenden Faktor für eine gute Wirkung bei allen Verfahren bildet der geschulte motivierte Anwender; somit ist auch in diesem Bereich noch Aufbauarbeit zu leisten.

Die dargestellten **Kosten** sind vor allem im relativen Vergleich der Methoden zu betrachten. Es zeigt sich, dass die chemischen Verfahren am kostengünstigsten sind. Die mechanischen und thermischen Methoden kosten ca. zwei- bis dreimal so viel. Ein Vergleich von Roth-Kleyer (1995) zeigt ähnliche Verhältnisse auf. Dasselbe bestätigt auch Schindler aus der Arbeitsgruppe "Wildkraut" aus Hannover (Landwirtschaftskammer Hannover 1993). In Berechnungen für die Deutsche Bahn AG waren die thermischen Methoden gar zehnmal teurer als die chemischen (Atmatzidis et al. 1995). Auch bei der Bahn spielen dieselben Grössen wie an den Strassen eine entscheidende Rolle. Die Lohnkosten der eingesetzten Arbeitskräfte basierend auf der Behandlungszeit und der Anzahl Behandlungen pro Jahr machen die grossen Unterschiede zwischen den Verfahren aus. Reine Gerätekosten tragen in den vorliegenden Versuchen nur gerade zu 19 - 39 % an die Gesamtkosten pro Kilometer und Jahr bei (ausgenommen die Verfahren Mähen und Flachstahlbesen, vgl. Tab. 15b).

Die mitberücksichtigten Kosten für Signalisation und Humusabtransport fallen bei den zwei Abrandverfahren stark ins Gewicht (mehr als 50 % der Kosten, vgl. Tab. 15b). Hingegen wurden die Entsorgung des anfallenden Humusmaterials und des Wischguts nicht berücksichtigt. Somit stellen die berechneten Werte eine optimistische Situation dar, da in der Praxis vielerorts noch Deponiekosten anfallen.

Pro behandelte Flächeneinheit ist das Infrarotgerät rund 50 % billiger als das Abflammgerät. Der 40 % höhere Gasverbrauch des breiter arbeitenden Infrarotgerätes gegenüber dem Abflammgerät macht weniger als 10 % der jährlichen Gesamtkosten für das Infrarotgerät aus (resp. weniger als 2 % der Gesamtkosten der Methode). Kostenberechnungen von Rannertshauser (1990) für einen Flächeneinsatz im Gemüsebau ergaben sogar, dass thermische und chemische Verfahren bei einer einmaligen Behandlung empfindlicher Unkräuter ungefähr gleich teuer sind. Dieser Flächenleistung wurde in den Versuchen am Strassenrand wenig Beachtung geschenkt, vielmehr ist die Leistung pro Strassenkilometer entscheidend.

Der hohe finanzielle und arbeitstechnische Aufwand der mechanischen Verfahren kann durch eine Kombination mit der regelmässigen Strassenreinigung erheblich reduziert werden. Dies bedingt aber eine entsprechende Ausbildung des Personals!

Weitere kombinierte Einsätze verschiedener Methoden mit hohem Sparpotential sind denkbar. So könnten durch eine Kombination der thermischen mit chemischen Methoden mindestens 1 -2 Behandlungen im

Vergleich zum rein thermischen Verfahren eingespart werden. Schwer bekämpfbare Pflanzen könnten durch einen einmaligen gezielten Herbizideinsatz bekämpft und damit die nötige Anzahl Durchgänge mit thermischen Geräten stark reduziert werden. Ebenso könnte die Arbeitsgeschwindigkeit der thermischen Verfahren bei einer neukeimenden Unkrautflora wahrscheinlich auf die eingesetzten 3 km/h erhöht werden, ohne dass die Wirkung mangelhaft würde. Diese Kombinationen müssen aber in der Praxis noch geprüft werden.

Zu überprüfen wäre, ob allenfalls ein Abranden mit dem Pflug oder einer Bankettfräse von Lohnunternehmen ebenso gut durchgeführt werden könnte. Die relativ hohen Anschaffungskosten und die geringe Auslastung der Geräte müssten in Vergleich zu den Mietkosten analysiert werden. Wichtige Entscheidungskriterien bilden beim Entscheid Kauf oder Miete auch rechtliche Überlegungen und Sicherheitsaspekte im Einsatz am Strassenrand. Gemäss unseren Berechnungen sind jährliche Einsatzstrecken von mehr als 200 km notwendig (Tab. 8-B, Anhang B). Entsprechende Angaben der Herstellerfirma liegen allerdings bei weniger als der Hälfte (Zaugg 1995). Tiefere Reparaturkosten und eine optimale Auslastung der Geräte dürften Gründe für die günstigeren Berechnungen der Firmen sein.

Mit einem gemeinsamen Maschineneinsatz von verschiedenen Unterhaltsdiensten können bei einer Verdoppelung der jährlichen Unterhaltsstrecke die Behandlungskosten pro Kilometer und Jahr um bis zu 20 % gesenkt werden. Nicht möglich ist dies bei den arbeitsintensiven thermischen Verfahren und der Variante mit Flachstahlbesen infolge der hohen Auslastung und der Witterungsabhängigkeit.

Nicht zu vernachlässigen ist das Unfallpotential der Methoden; je länger die Aufenthaltszeit an der Strasse, desto grösser die Gefahr. Folglich bilden thermische und mechanische Verfahren im regelmässigen Einsatz das grösste Risiko für das Personal.

Bei der Behandlung des Mittelstreifens ist die Sperrung mindestens einer Fahrspur notwendig. Dabei sind von den thermischen und dem mechanischen Verfahren mit Flachstahlbesen die grösste Verkehrsbehinderung pro Kilometer und Jahr zu erwarten. Im Einsatz auf dem Pannestreifen verursachen nur die mechanischen Abrandmassnahmen eine Betriebsstörung.

Aus betrieblichen, sicherheitstechnischen und finanziellen Gründen ist eine regelmässige Behandlung des Mittelstreifens mit mechanischen und thermischen Verfahren fragwürdig. Bauliche Massnahmen bei einer Belagssanierung sind allen andern Methoden vorzuziehen. Falls dies nicht möglich ist und es die Situation erfordert, ist die gezielte chemische Behandlung mit einem Blattherbizid vorläufig die sinnvollste Variante (siehe auch Teil 4 "Ökologische Aspekte").

Ein Vergleich der Kosten für eine baulichen Sanierung und für eine regelmässige Unkrautbekämpfung ist heute noch nicht möglich, da genaue Daten über die Schadwirkung der Pflanzen fehlen. In unveröffentlichten Berichten und persönlichen Mitteilungen werden zum Teil Sanierungskosten von mehreren Zehntausend Franken pro Kilometer genannt. Entscheidend für diesen Vergleich ist die Frage, wie lange eine baulich sanierte Strecke ohne Unterhalt bleiben kann.

5. Zusammenfassung

- An Problemstellen gezielt eingesetzte Herbizide sind ökonomisch günstiger als die untersuchten Symptombekämpfungs-Massnahmen mechanischer oder thermischer Art. Hauptgrund ist der niedrige Arbeitsaufwand und der kleine Energieverbrauch bei der chemischen Behandlung.
- Der Propangasverbrauch und die relativ langsame Arbeitsgeschwindigkeit, verbunden mit der grossen Anzahl Behandlungen bei den thermischen Verfahren, verursachten einen beträchtlichen jährlichen Arbeits-, Energie- und Kostenaufwand.
- Abranden ist ebenfalls mit hohem Arbeits-, Material- und Energieaufwand verbunden, auch wenn dieser Aufwand auf mehrere Jahre verteilt werden kann.
- Durch eine Kombination der mechanischen Unkrautbekämpfung mit der regelmässigen Strassenreinigung sind Kosteneinsparungen möglich.
- Das heute in der Praxis verbreitete Mähen der Bankette kann aus wirtschaftlicher Sicht befürwortet werden, thermische und andere mechanische Methoden kosten ca. das Doppelte. Werden positive Nebenwirkungen mit einbezogen (vorbeugen der Verunkrautung mit Problempflanzen), so können durch das regelmässige Mähen Folgekosten eingespart werden; das gleiche gilt auch für die Strassenreinigung.
- Je grösser die Anzahl der beteiligten Personen und Fahrzeuge, desto höher die potentielle Unfallgefahr. Bei den chemischen Methoden sind die Aufenthaltszeiten der Personen am Strassenrand im Vergleich zu den mechanischen und thermischen Verfahren nur ein fünftel bis halb so lang.

Teil 4 OEKOLOGISCHE ASPEKTE

E. Aeschimann, D. Gut, Eidg. Forschungsanstalt, CH-8820 Wädenswil

O. Jolliet, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Institut d'Aménagement des Terres et des Eaux (IATE), Hydrologie et Aménagements, GR-Ecublens, CH-1015 Lausanne

1. Einleitung

Die untersuchten chemischen, mechanischen und thermischen Verfahren unterscheiden sich sowohl in ihrer Wirkung auf Unkräuter als auch in ökonomischer und ökologischer Hinsicht. Insbesondere das Umweltverhalten bedarf vertiefter Abklärungen, damit die verschiedenen Verfahren objektiver als bisher verglichen werden können.

Die Umweltauswirkungen der diskutierten Unkrautbekämpfungs-Verfahren müssen auf verschiedenen Stufen betrachtet werden:

Für die Herbizide wurden schon im Auswahlverfahren Faktoren wie Mobilität und Persistenz oder ökotoxikologische Eigenschaften berücksichtigt. Es wurden grundsätzlich nur Stoffe eingesetzt, die diesbezüglich aufgrund des heutigen Stand des Wissens keine wesentlichen nachteiligen Nebenwirkungen aufweisen. Zusätzliche Abklärungen mit diesen Stoffen dienten dazu, das Umweltverhalten spezifisch an Strassen zu überprüfen (Bodenchromatographie, Säulenversuche).

Eine Energiebilanz der verschiedenen Verfahren stellt eine weitere Stufe der Auswirkungen auf die Umwelt dar. Die Resultate der durchgeführten Versuche und die Angaben zum Energiegehalt in Geräten und verwendeten Materialien (graue Energie) erlauben eine objektive Gewichtung der Verfahren.

Schlussendlich kann aus der Energiebilanz und den daraus resultierenden Stoffflüssen in Luft, Wasser und Boden eine Ökobilanz erstellt werden.

Unter Ökobilanz wird allgemein ein möglichst umfassender Vergleich der Umweltauswirkungen zweier oder mehrerer Systeme verstanden - einheitliche Definitionen bestehen bis heute nicht. Verschiedene Methoden werden verwendet, und jedes Modell hat zum Teil sehr unterschiedliche Systemgrenzen. Internationale Diskussionen zur Erarbeitung einer allgemein akzeptierten Methode sind im Gange, werden aber noch einige Zeit in Anspruch nehmen (Hofstetter und Braunschweig 1994; Schaltegger 1994).

Einen guten Einstieg in das Thema "Ökobilanzierung" bieten Hofstetter (1994) und Egli (1994). Empfehlenswerte Grundlagenliteratur: Müller-Wenk 1978; Ahbe et al. 1990; Habersatter und Widmer 1991; Etterlin et al. 1992; Gottlieb-Duttweiler-Institut 1992; Marti und Akos 1992; Schaltegger und Sturm 1992; UBA 1992; Beck 1993; Braunschweig und Müller-Wenk 1993; Sturm 1993; Jolliet 1994.

Die verwendete Immissionsgrenzwert-Methode erlaubt einen Vergleich von Boden-, Luft- und Wasserbelastung. Sie berücksichtigt die Verweildauer und das Verteilvolumen der Stoffe in Luft, Wasser und Boden (Jolliet 1993; Ö.B.U. 1994).

2. Material und Methoden

Material- und Energieaufwand der Verfahren wurden auf den 500 m langen Teststrecken in Wädenswil erhoben (siehe Teil 2, "Biologische Wirkung"). Zusätzliche Untersuchungen im Labor erfolgten vor allem zur Abklärung der umweltrelevanten Nebenwirkungen der Herbizide. Diese Daten sind vor allem wesentlich für die Erstellung der Ökobilanz.

2.1 Mobilität der Herbizide (Dickschicht-Bodenchromatographie)

Verschiedene Herbizide mit geringer Mobilität in landwirtschaftlichen Böden wurden untersucht auf ihre Mobilität unter den schlecht adsorptiven Bedingungen im Bankett. Mit der Methode von Gerber et al. (1970) wurde die relative Mobilität auf Kiessand mit einer Körnung von weniger als 2 mm erfasst. So konnten die Wirkstoffe sowohl im Normalfall als auch im schlechtesten Fall beurteilt und ungünstige Stoffe aus dem Versuchsprogramm gestrichen werden.

2.2 Mobilität von Glyphosate in Glaskolonnen mit Kiessand

Mit diesem Versuch wurde das Auswaschverhalten des erfolgversprechendsten Herbizides genauer untersucht. Zu diesem Zweck wurde in vier grossen Glaskolonnen ein Bodenprofil aus Bankettmaterial aufgebaut. Während des 430 Tage dauernden Versuches wurde in einem Zeitraum von 230 Tagen in neun aufeinanderfolgenden Applikationen Glyphosate in zwei- resp. zwanzigfacher Konzentration auf die Säulen aufgetragen. Zwischen jeweils zwei Applikationen (Abstand ca. ein Monat) wurde ein durchschnittlicher Halbjahresniederschlag simuliert. Das Sickerwasser und nach Versuchsende auch der Kiessand der Säulen wurden bezüglich Rückständen von Glyphosate und dessen erstem Abbauprodukt (Aminomethylphosphonsäure, AMPA) analysiert.

Eine genaue Beschreibung der Versuchsanlage, die Versuchsdurchführung und alle Resultate liegen als separater Bericht im Anhang C bei.

2.3 Methodik zur Erstellung einer Ökobilanz

Die Methodik der "Ökologischen Knappheit" (Müller-Wenk 1978) wurde von Jolliet an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Lausanne weiterentwickelt und aufgrund der Arbeiten von Habersatter und Widmer (1991) und Ahbe et al. (1990) ständig den neusten Erkenntnissen angepasst. Alle Berechnungen wurden an der ETH Lausanne durchgeführt.

Zuerst wurde für jedes Verfahren der Energieaufwand erfasst. Berücksichtigt wurden Treibstoffverbrauch, Maschinenherstellung, Propangasverbrennung und die ganze Kette der Energieaufbereitung. Bei den Herbiziden wurde der energetische Aufwand für die Herstellung und Anwendung einbezogen. Es wurde darauf geachtet, selbst erhobene Daten, Literaturdaten und eigene Schätzwerte jeweils offen zu deklarieren. Aus der Energiebilanz wurden die Schadstoffflüsse in Luft, Wasser und Boden ermittelt.

In einem zweiten Schritt wurden die verschiedenen Emissionen bewertet und aggregiert. Die Gewichtungsfaktoren wurden aufgrund von Immissionsgrenzwerten (BUWAL 1992), der geschätzten

Verweildauer der Stoffe und des Verteilvolumens (pro m² Boden) in Luft, Wasser und Boden sowie deren Nebenwirkungen auf Wasser- und Bodenorganismen festgelegt (Jolliet 1993; Jolliet 1994). Eine genaue Beschreibung der Methode und die zur Berechnung verwendeten Umrechnungs- und Gewichtungsfaktoren können bei den Autoren bezogen werden.

3. Resultate

3.1 Umweltverhalten der Herbizide

In Vorversuchen wurden relevante Aspekte des Umweltverhaltens diverser weiterer herbizider Wirkstoffe untersucht. Mobilitäts- und Leachingtests wurden durchgeführt, und die erfolgversprechendsten Stoffe kamen in den Freilandversuchen zum Einsatz.

3.1.1 Mobilität von Herbiziden (Dickschicht-Bodenchromatographie)

Für die Auswahl möglicher Herbizide an Strassen waren Mobilität und Persistenz wesentliche Kriterien. Allerdings beziehen sich die in der internationalen Literatur vorhandenen Daten zum Umweltverhalten herbizider Wirkstoffe im allgemeinen auf landwirtschaftlich genutzte Böden, die meist ein anderes Sorptionsverhalten und eine andere biologische Aktivität aufweisen als der Bereich unmittelbar hinter dem Randabschluss an Strassen. Es war deshalb notwendig, das Umweltverhalten erfolgversprechender Herbizide näher zu untersuchen unter Bedingungen, die eher dem Strassenrand entsprechen.

Mit der Dickschicht-Bodenchromatographie wurde die Mobilität der Herbizide grob in vier Klassen eingeteilt. Die vier Klassen "wenig", "mässig", "stark" und "sehr stark" mobil sind relative Einteilungen aller untersuchten Produkte (Tab. 16).

Bezogen auf landwirtschaftlich genutzte Böden (= Standarderde) waren die verwendeten Bodenherbizide Oryzalin, Flurochloridon und Prosulfocarb deutlich weniger mobil als die bisher verwendeten älteren Mittel Atrazin, Simazin und Diuron. Die beiden Blattherbizide Glyphosate und Glufosinat zeigten sehr unterschiedliche Mobilitätseigenschaften. Glyphosate war wenig mobil und somit vergleichbar mit den neuen Bodenherbiziden, Glufosinat dagegen war sehr stark mobil. Die zusätzlichen Untersuchungen der relativen Mobilität auf Kiessand bei einigen Wirkstoffen zeigte die gleiche Reihenfolge wie auf Standardboden; insgesamt wurde die Mobilität allerdings durch die schlechten Adsorptionsbedingungen erwartungsgemäss um eine Klasse erhöht.

Tabelle 16: Vergleich der Mobilität verschiedener Herbizide mittels Dickschicht-Bodenchromatographie. Die Bewertung erfolgte nach der folgenden relativen Skala: wenig mobil < mässig mobil < stark mobil < sehr stark mobil.

Wirkstoffe	Mobilität	
	auf Standarderde	auf Kies mit 2mm Ø
Blattherbizide		
Glyphosate	wenig	mässig
Glufosinat	stark	sehr stark
loxynil	wenig	—
Bodenherbizide		
Atrazin	stark	—
Simazin	stark	—
Diuron	mässig	—
Oryzalin	wenig	mässig
Flurochloridon	wenig	mässig
Prosulfocarb	wenig	mässig
Dichlobenil	wenig	—
Blatt- und Bodenherbizide		
Oxyfluorfen	wenig	—
Metsulfuron - Methyl Thifensulfuron - Methyl	sehr stark	—
Bifenox	wenig	—
Blattherbizide (Wuchsstoff)		
2,4-D	stark	—
MCPP	stark	—

—: nicht untersucht

3.1.2 Mobilität von Glyphosate in Kolonnen mit Kiessand (Säulenversuche)

In einem zweiten Versuch wurden die Mobilität und das Auswaschverhalten von Glyphosate unter Bedingungen untersucht, wie sie für das Bankett repräsentativ sind (Laborversuch mit vier Glaskolonnen mit Bodenprofil aus Bankettmaterial).

Im Sickerwasser konnten bei einer Nachweisgrenze von 2 ppb auch bei 20-fach erhöhter Normaldosierung (neun Applikationen) keine Spuren von Glyphosate nachgewiesen werden. Das erste Abbauprodukt AMPA (Aminomethylphosphonsäure) wurde in den Säulen mit geringerer applizierten Menge in Konzentrationen von wenigen ppb gefunden. In den Säulen mit 20-facher Normaldosierung wurden Konzentrationen bis 2.3 ppm nachgewiesen. Im Füllmaterial wurde Glyphosate bis 15 cm resp. 40 cm Bodentiefe gefunden (2- resp. 20-fache Normaldosierung). Die Konzentrationen von AMPA lagen bei 100 - 300 ppb resp. 100 - 1400 ppb (vgl. auch separaten Bericht in Anhang C).

3.2 Energie

Im Methodenvergleich wurde der Ressourcenverbrauch der verschiedenen Unkrautbekämpfungs-Verfahren während dreier Vegetationsperioden erhoben (Tab. 17). Durch die Umrechnung der Inputmengen an Diesel, Propangas und grauer Energie für die Fahrzeuge, Geräte und Pestizide konnte eine Energiebilanz der verschiedenen Methoden erstellt werden. Alle Umrechnungsfaktoren wurden aus diversen Untersuchungen zusammengestellt. In den Publikationen von Habersatter und Widmer (1991) und Jolliet (1994) sind die meisten Faktoren wiedergegeben. Ein umfangreiches Literaturverzeichnis kann bei den Autoren angefordert werden.

Tabelle 17: Im Methodenvergleich und auf den Teststrecken der Nationalstrasse erhobene Grunddaten zur Berechnung des Energieaufwandes verschiedener Unkrautbekämpfungs-Methoden, alle Angaben pro Kilometer und Jahr (Vegetationsperioden 1992-1994). Verfahren vergleiche Teil 2 "Material und Methoden" und Legende der Abb. 19, sowie Anhang B.

	Diesel- verbrauch ⁹		Propan- verbrauch ⁹		Maschinen- gewicht ¹⁰		Aktivsubstanz Herbizide ⁹		Behandlungen für eine vergleichbare Wirkung ⁹	Behandlungs- geschwindigkeit ⁹
	l	MJ	kg	MJ	g	MJ ¹¹	g	MJ ¹²	Anzahl	km/h
Infrarotgerät (Standard- breite 0.4 m)	8.0	311	17.6	901	733	100	0	0	4	3
Abflam- gerät	8.0	311	16.0	819	633	87	0	0	4	3
Seilbesen	11.4	444	0	0	1556	213	0	0	0.33	0.7
Abranden mit Pflug & Aufnahme	13.7	535	0	0	1935	265	0	0	0.25	0.8
Flachstahl- besen	18.0	700	0	0	2094	287	0	0	3	1
Glyphosate	3.0	117	0	0	342	70	179	88	2	4
Glufosinat	4.5	175	0	0	512	47	75	17	3	4
Dichlobenil	1.4	56	0	0	188	26	113	25	1	4
Oryzalin	2.8	112	0	0	342	47	89 Gly 84 Oryz	44 17	1 1	4

Die Faktoren zur Berechnung des spezifischen Gesamtenergieverbrauchs einer Methode (Abb. 19) - basierend auf den Grunddaten von Tabelle 17 - wurden, wo vorhanden, der Literatur entnommen oder basieren auf Angaben von Firmen und Prüfstellen. Sie sind in Anhang B aufgeführt.

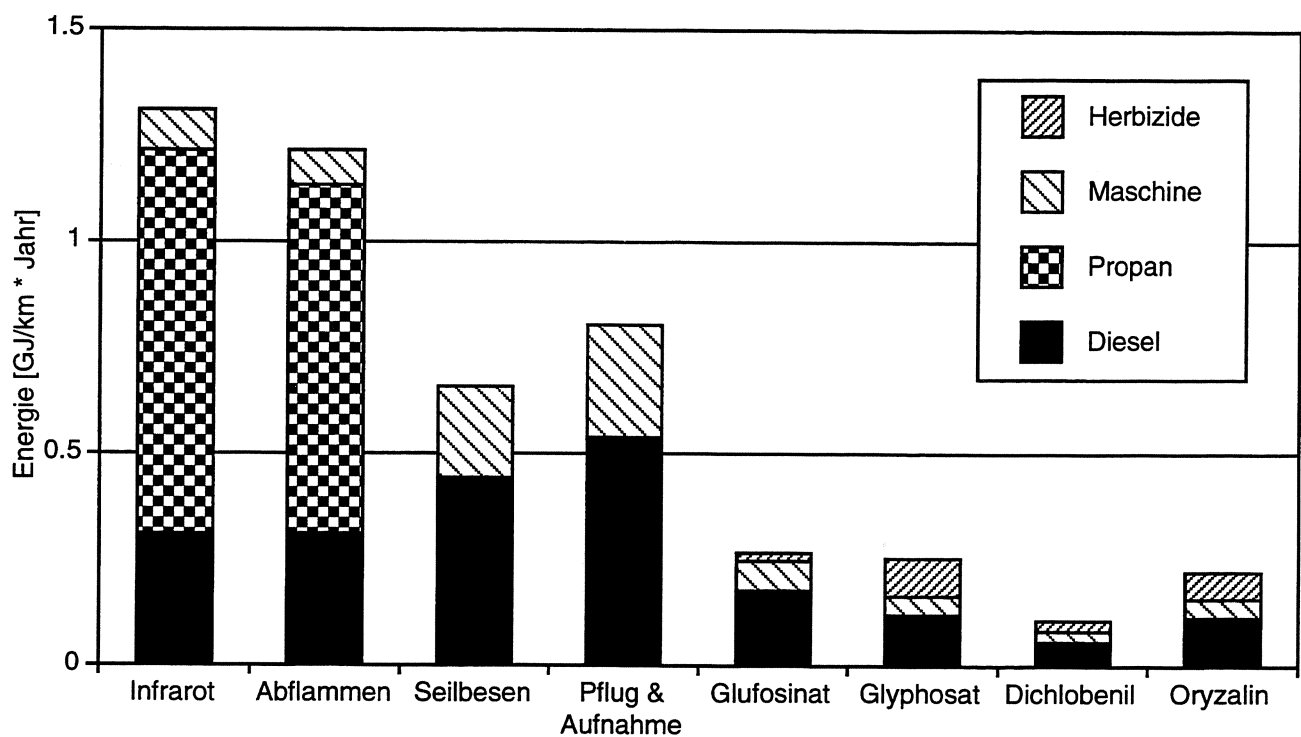
⁹ Im vorliegenden Versuch erhobene Daten (vgl. auch Anhang B)

¹⁰ Standardwerte für die Fahrzeuge (10 Jahre Abschreibung, 800-1000 jährliche Betriebsstunden); für Geräte Modellwerkhof mit 150 km Strassenbankette zugrundegelegt (Tab. 15b und Anhang B)

¹¹ Umrechnung nach Leach (1975)

¹² Verwendeter Umrechnungsfaktor zur Herstellung von 1 kg Wirkstoff: 205 MJ. Für Glyphosate lagen genauere Werte von 452 MJ/kg a.i. vor (Pimentel 1980; Shahbazi und Goswami 1986)

Die thermischen Verfahren benötigten durch den hohen Propangasverbrauch ca. zwei- bis fünfmal soviel Gesamtenergie wie die mechanischen und chemischen Verfahren (Abb. 19). Der Dieselverbrauch war bei den mechanischen Methoden eindeutig am höchsten, bedingt durch die hohe Anzahl an Fahrzeugen. Die graue Energie von Fahrzeugen und Geräten sowie die mitberücksichtigte Abnutzung der Verschleisssteile war bei den mechanischen Verfahren ebenfalls deutlich höher. Die chemischen Varianten waren bezüglich Dieselverbrauch, aber auch unter Einbezug von in Geräten und Produkten enthaltener Energie die sparsamsten Verfahren. Diesel- und "Maschinenverbrauch" verhielten sich proportional zur Anzahl durchgeführter Behandlungen, deshalb war die einmalige Behandlung mit Dichlobenil mit sehr geringem Energieaufwand verbunden. Die graue Energie der Herbizide machte bei Glyphosate mit einem relativ hohen Wirkstoffaufwand von 178 g/km*Jahr ca. ein Drittel der gesamten aufgewendeten Energie aus (Tab. 17). Allerdings sind die Schätzungen für den Energieaufwand zur Herbizidproduktion bis heute nicht vollständig abgesichert.



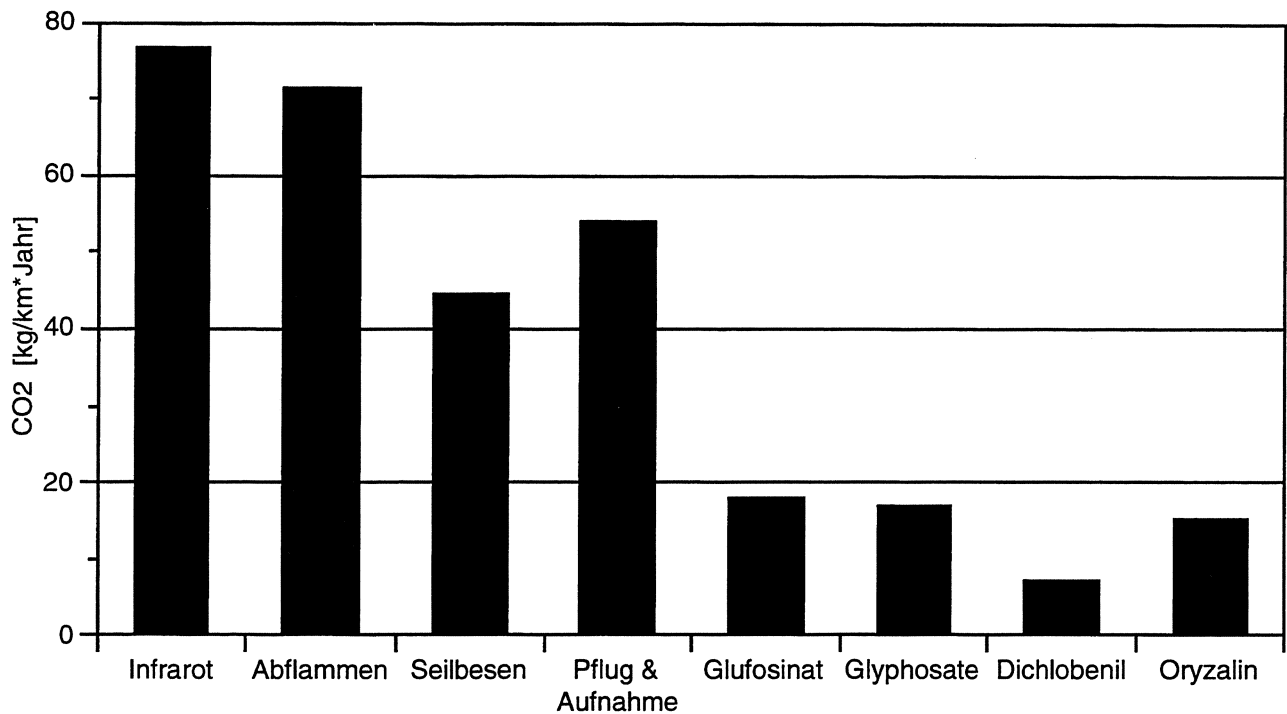
Infrarot: 4 Behandlungen, rechnerische Standardbreite von 0.4 m, 3 km/h
 Abflammen: 4 Behandlungen, Gerätebreite von 0.4 m, 3 km/h
 Seilbesen: Jedes 3. Jahre behandelt, Gerätebreite von 0.2 m, 0.7 km/h, inkl. Signalisation
 Pflug & Aufnahme: Jedes 4. Jahre behandelt, Gerätebreite von 0.2 m, 0.8 km/h, inkl. Signalisation
 Glufosinat: 3 Behandlungen, Behandlungsbreite von 0.25 m, 4km/h
 Glyphosate: 2 Behandlungen, Behandlungsbreite von 0.25 m, 4km/h
 Dichlobenil: 1 Behandlung, Behandlungsbreite von 0.25 m, 4km/h
 Oryzalin: Je 1 Oryzalin- und 1 Glyphosate-Behandlung, Behandlungsbreite von 0.25 m, 4 km/h

Abbildung 19: Jährlicher Energieaufwand von thermischen, mechanischen und chemischen Unkrautbekämpfungsmethoden an Strassenrändern. Zugrundeliegende Daten in Tabelle 17 und in Anhang B.

3.3 Stoffflüsse

Aus dem Energie-Input für die Verfahren wurden die daraus emittierten Schadstoffe berechnet. Von 17 Luftschadstoffen, 16 wassergefährdenden und 18 bodenrelevanten Stoffen wurden die Flüsse ermittelt. Dazu kamen die Wirkstoffe der Herbizide und die dafür benötigten Energien. Von den ursprünglich berücksichtigten Schadstoffen waren in den untersuchten Verfahren folgende quantitativ relevant:

Für die Luft CO₂, SO₂, NO_x, N₂O, HC, CO und Partikel, für den Boden Herbizide und feste Abfälle und für das Wasser anorganisch gelöste Stoffe. In Abbildung 20 und 21 sind die berechneten Stoffflüsse der oben erwähnten Größen dargestellt.



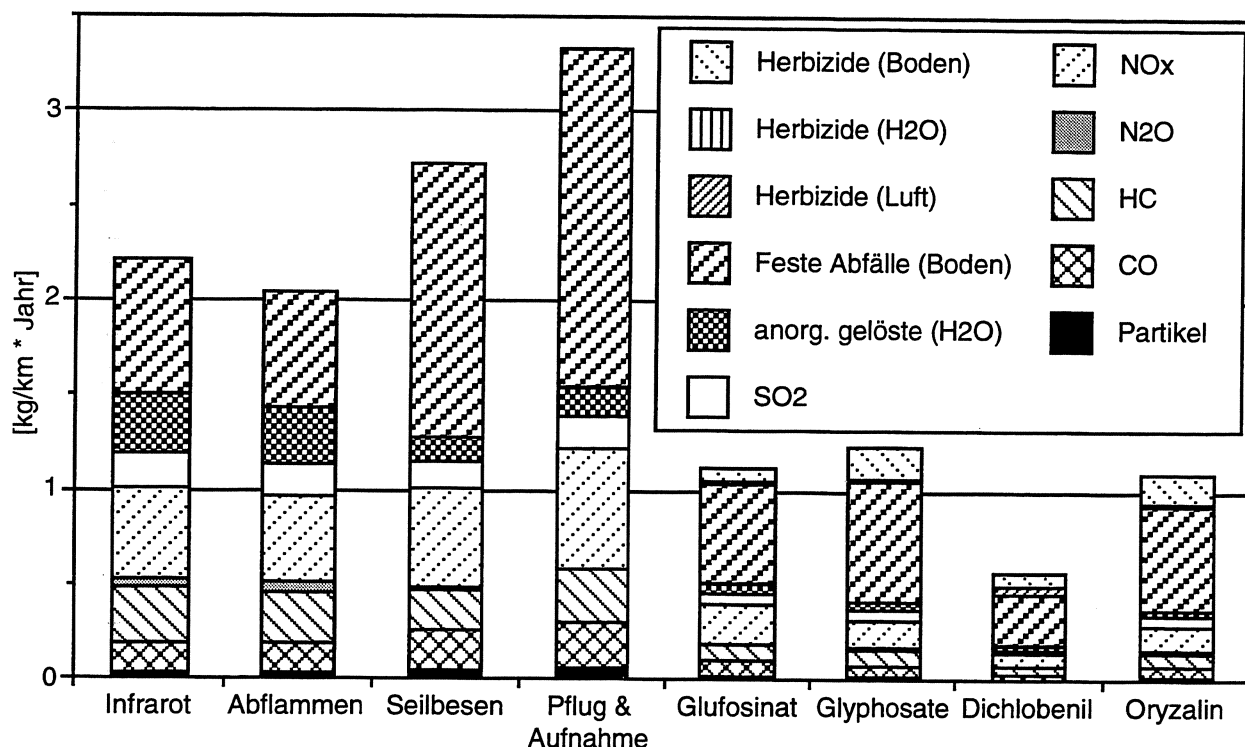
Infrarot:	4 Behandlungen, rechnerische Standardbreite von 0.4 m, 3 km/h
Abflammen:	4 Behandlungen, Gerätebreite von 0.4 m, 3 km/h
Seilbesen:	Jedes 3. Jahre behandelt, Gerätebreite von 0.2 m, 0.7 km/h, inkl. Signalisation
Pflug & Aufnahme:	Jedes 4. Jahre behandelt, Gerätebreite von 0.2 m, 0.8 km/h, inkl. Signalisation
Glufosinat:	3 Behandlungen, Behandlungsbreite von 0.25 m, 4km/h
Glyphosate:	2 Behandlungen, Behandlungsbreite von 0.25 m, 4km/h
Dichlobenil:	1 Behandlung, Behandlungsbreite von 0.25 m, 4km/h
Oryzalin:	Je 1 Oryzalin- und 1 Glyphosate-Behandlung, Behandlungsbreite von 0.25 m, 4 km/h

Abbildung 20: Kohlendioxidausstoss (CO₂) bei thermischen, mechanischen und chemischen Unkrautbekämpfungs-Methoden an Strassenrändern [kg CO₂ pro Kilometer und Jahr]. Zugrundeliegende Daten in Tabelle 17 und in Anhang B.

Die thermischen Verfahren emittierten durch den hohen Propangasverbrauch ca. viermal soviel CO₂ wie die chemischen Methoden (Abb. 20). Wegen der hauptsächlich eingesetzten fossilen Brennstoffe war der CO₂-Ausstoss eng gekoppelt an den Energieaufwand (Abb. 19 und 20).

Analog zur CO₂-Emission verhielten sich die übrigen Schadstoffe. Der hohe Energieverbrauch der thermischen Verfahren führte zu höheren Schadstoff-Emissionen im Vergleich zu den übrigen eingesetzten Verfahren (Abb. 21). Einzig die festen Abfälle im Boden, welche durch die Bereitstellung der benötigten Energie zur Herstellung der Geräte anfallen, waren bei den mechanischen Verfahren ca. doppelt so hoch

wie in den thermischen und chemischen Methoden. Die Herbizide fielen nur im Boden mengenmässig ins Gewicht, einzig beim Herbizid Dichlobenil muss mit einem gewissen Anteil in der Luft gerechnet werden (Tab. 18 und Abb. 21).



Infrarot: 4 Behandlungen, rechnerische Standardbreite von 0.4 m, 3 km/h
 Abflammen: 4 Behandlungen, Gerätebreite von 0.4 m, 3 km/h
 Seilbesen: Jedes 3. Jahre behandelt, Gerätebreite von 0.2 m, 0.7 km/h, inkl. Signalisation
 Pflug & Aufnahme: Jedes 4. Jahre behandelt, Gerätebreite von 0.2 m, 0.8 km/h, inkl. Signalisation
 Glufosinat: 3 Behandlungen, Behandlungsbreite von 0.25 m, 4km/h
 Glyphosate: 2 Behandlungen, Behandlungsbreite von 0.25 m, 4km/h
 Dichlobenil: 1 Behandlung, Behandlungsbreite von 0.25 m, 4km/h
 Oryzalin: Je 1 Oryzalin- und 1 Glyphosate-Behandlung, Behandlungsbreite von 0.25 m, 4 km/h

Abbildung 21: In Boden, Wasser und Luft emittierte Stoffe von thermischen, mechanischen und chemischen Unkrautbekämpfungs-Methoden an Strassenrändern [kg pro Kilometer und Jahr]. Zugrundeliegende Daten in Tabelle 17 und in Anhang B.

3.4 Bewertung der Stoffflüsse

Wie einleitend beschrieben, sind die Diskussionen zur Bewertung der verschiedenen Stoffflüsse international noch im Gange. Für eine Aggregierung unterschiedlicher Indikatoren der Luft-, Wasser- und Bodenbelastung zu einer Summenbelastung gibt es derzeit mangels wissenschaftlicher Basis noch keine internationale Konvention (UBA 1992).

In Anlehnung an die heute am weitesten verbreiteten Bewertungsmethode der Immissionsgrenzwerte (Habersatter und Widmer 1991) wurde für die geprüften Verfahren ebenfalls eine Bewertung vorgenommen.

Tabelle 18: Beurteilung der Umweltgefährdung durch Herbizide am Strassenrand: Verteilung, Richtwerte und Halbwertszeiten ausgewählter Herbizide für Luft, Wasser und Boden (Literaturangaben und Schätzwerte).

		Verfrachtung ¹³	Verwendete Richtwerte ¹⁴	Halbwertszeiten ¹⁵
		[%]	[mg/m ³]	[Tage]
Glyphosate	Luft	0	12.2 ¹⁶	12
	Wasser	5	1050 ¹⁷	12 ¹⁸
	Boden	95	8800 ¹⁹	24 ²⁰
Glufosinat	Luft	0	1.26 ¹⁶	20
	Wasser	10	70 ¹⁷	20
	Boden	90	1700 ¹⁹	20 ²¹
Dichlobenil	Luft	40	5 ¹⁶	1.4 ²²
	Wasser	5	35 ¹⁷	60
	Boden	55	1700	60 ²³
Oryzalin	Luft	0	0.8 ¹⁶	20
	Wasser	5	7.2 ¹⁷	20
	Boden	95	1700	65 ²⁴

¹³ Prozentuale Verfrachtung in Luft, Wasser und Boden; Schätzwerte

¹⁴ Erklärungen zu Richt-, Toleranz- und Grenzwerte vgl. Diskussion im Anhang C. Schätzwerte oder Extrapolation, falls keine Literaturangaben bekannt

¹⁵ Falls keine Literaturangaben bekannt waren, wurden die Halbwertszeit von Boden auch für Luft und Wasser angenommen. Ausnahme: Glyphosate und Dichlobenil

¹⁶ Berechnet aus LC₅₀ (4h) für Ratte (Perkow 1992), multipliziert mit Faktor 10 ergibt NOEL-Wert für Ratte (Ammon 1994; Jager et al. 1994), multipliziert mit üblichem Sicherheitsfaktor 100 für Mensch (DFG 1990)

¹⁷ Trinkwasser-Richtwert (DFG 1990)

¹⁸ Baier et al. (1985)

¹⁹ Gewählter Indikator für Bodenbelastung: Regenwurmtoxizität, extrapoliert aus LC₅₀-Wert beim Daniel-Trichtertest mit *Lumbricus terrestris*, Sicherheitsfaktoren analog der Luftberechnungen (Högger 1993; Jolliet 1993)

²⁰ Heidler (1995)

²¹ Domsch (1992)

²² Solvay-Duphar B.V., NL-1243 ZG 's-Graveland (1995), persönliche Mitteilung

²³ Wauchope et al. (1992)

²⁴ Banks und Robinson (1984)

Die in die Bewertung eingeflossenen Grunddaten wurden in den Tabellen 17 und 18 sowie im Anhang B zusammengestellt. Wurde die "kritische Belastung" in Anlehnung an toxikologisch begründbare Grössen gewählt (Tab. 18), so stellen die thermischen und mechanischen Methoden eine ungefähr gleich grosse Belastung für Boden, Luft und Wasser dar. Die chemischen Verfahren wiesen nach unseren Berechnungen nur eine halb so grosse Belastung auf (Tab. 19). Einzig das Bodenherbizid Oryzalin zeigte eine ähnlich grosse Belastung wie die thermischen und mechanischen Methoden. Oryzalin und Dichlobenil hatten wegen der gewählten Grenzwerte und Halbwertszeiten (Tab. 18) eine relativ grosse Belastung des Bodens zur Folge. Die Belastung durch NO_x in den thermischen, mechanischen und den zwei Blattherbizid-Verfahren machte mehr als 50 % der Gesamtbelastung aus. Die festen Abfälle im Boden spielten bei der Gesamtbewertung eine untergeordnete Rolle. Ebenfalls eine geringe Belastung hatten die hohen Mengen an emittiertem CO₂ für die Umwelt (Abb. 20).

Tabelle 19: Boden, Wasser und Luft belastende Stoffe (m²-Äquivalente) von thermischen, mechanischen und chemischen Unkrautbekämpfungs-Methoden an Strassenrändern. Gewichtete Stofffüsse aufgrund der verwendeten Immissionsgrenzwert-Methode. Zugrundeliegende Daten in Tabelle 17 und in Anhang B.

	Luftschadstoffe							Herbizid			Summe
	CO ₂	Partikel	CO	HC	N ₂ O	NO _x	SO ₂	Luft	Wasser	Boden	m ² -Äquivalente
Infrarotgerät (Standardbreite 0.4 m)	36.8	39.7	0.3	6.4	4.5	104.6	17.8	0	0	0	210
Abflamngerät	34.3	38.7	0.3	6.0	4.1	101.9	16.5	0	0	0	202
Seilbesen	21.4	50.9	0.4	5.0	0.2	116.2	13.7	0	0	0	208
Abranden mit Pflug & Aufnahme	25.9	61.5	0.5	6.0	0.3	140.0	16.8	0	0	0	251
Glyphosate	8.6	19.9	0.2	2.0	0.1	45.8	5.3	0	1.9	31.4	115
Glufosinat	8.2	15.0	0.1	2.1	0.3	32.6	5.0	0	0.1	18.3	82
Dichlobenil	3.5	6.9	0.1	0.9	0.1	15.3	2.2	0	8.5	86.6	124
Oryzalin	7.2	14.0	0.1	1.8	0.2	30.8	4.4	0	32.9	129.6	221

4. Diskussion

4.1 Probleme der Ökobilanzierung

Die heute intensiv geführten Diskussionen zur Erstellung einer objektiven Beurteilungsmethodik verschiedener Umweltauswirkungen finden im Rahmen der SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) statt. Sechs Arbeitsgruppen teilen sich die verschiedenen Aufgabenbereiche auf. Die Gruppe Impact Assessment (Bewertung von Umwelteinflüssen) versucht, methodische Bausteine für die ökologische

Bewertung von Ökoinventaren zu erstellen (Hofstetter et al. 1994). In den Mitteilungen²⁵ der SETAC wird regelmässig über die aktuellen Aktivitäten der Arbeitsgruppen berichtet. Interessierte Personen können sich direkt bei den einzelnen Arbeitsgruppen informieren.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes können die international diskutierten methodischen Fragen nicht beantwortet werden. Die dringend benötigten Daten zur Bewertung und Aggregation der Stoffflüsse sind neben wissenschaftlichen Ungenauigkeiten auch starken gesellschaftlichen und politischen Einflüssen ausgesetzt, was einen wissenschaftlichen Konsens enorm erschwert.

Trotz Vorbehalten und teils diskutabler Grunddaten sollte aber nicht a priori jede Aussage verweigert werden. Stehen in Zukunft solidere Daten zur Verfügung, so können diese jederzeit neu in die Berechnungsmodelle eingebaut werden.

Die dargestellten Parameter der Umweltbelastung bilden eine Auswahl und sind in der vorliegenden Form nicht vollständig, doch von den zahlreichen erfassten Grössen erwiesen sich einige nach der Auswertung als nicht relevant und konnten daher weggelassen werden. Geruch, Staub und Lärm, verursacht durch die Anwendung der Geräte, sind weitere hier nicht berücksichtigte Faktoren, welche einen Einfluss auf die Gesundheit von Mensch und Tier haben könnten. Diese Faktoren werden heute im allgemeinen noch nicht in Modelle einbezogen, sie könnten jedoch in Zukunft zu den heute berücksichtigten Parametern dazukommen.

Nach den bisherigen Erkenntnissen stellt sich folgende Hauptfrage: Wie sind allfällige unerwünschte Nebenwirkungen von Herbiziden auf die belebte Umwelt und den Menschen (Boden- und Wasserbelastung) zu gewichten im Verhältnis zum hohen Energieverbrauch und den daraus resultierenden Belastungen primär der Luft bei den thermischen Verfahren? Diese Frage ist, wie in den einleitenden Bemerkungen dargelegt, nicht generell zu beantworten. Hauptsächlich der fehlende Konsens über die grundlegenden Richtwerte erschwert eine objektive Diskussion. Wir beschränken uns hier deshalb darauf, die einzelnen Faktoren wie Energieverbrauch, Emissionen, usw. gesondert darzustellen.

4.2 Energieverbrauch

Die Berechnung der Energie-Inputs der thermischen und chemischen Verfahren aus den Messwerten pro Kilometer und Jahr (Abb. 19) zeigten deutlich, dass zur Freihaltung eines Bankettstreifens von Bewuchs die thermischen Methoden bis fünfmal mehr Energie benötigen als Herbizide. Analoge Erhebungen bei der Deutschen Bahn AG ergaben sogar ein Verhältnis von 1:14 zuungunsten der thermischen Verfahren (Atmatzidis et al. 1995). Diesen Berechnungen lagen fünf thermische resp. eine chemische Behandlung pro Jahr zugrunde, mit durchschnittlichen Arbeitsgeschwindigkeiten von 2.5 resp. 40 km/h (Behandlungsbreite ca. 4.4 m). Die grösseren Unterschiede in den erhobenen Grunddaten zwischen thermischer und chemischer Methode erklären somit die grösseren Differenzen der Gesamtenergiemengen.

²⁵ LCA-News, bi-monthly Newsletter of SETAC-Europe. Adresse: SETAC-Europe, Avenue E. Mounier 83, Box 1, B-1200 Bruxelles, Telefax: +32'2'7705386

Beim Konzept einer nicht ganzflächigen, sondern punktuellen Behandlung unerwünschter Pflanzen dürfte sich das Verhältnis des Gesamtenergie-Einsatzes wohl eher noch deutlicher zugunsten des chemischen Verfahrens verschieben, da die heute verfügbaren thermischen Geräte nicht auf Einzelpflanzenbehandlungen ausgerichtet sind.

4.3 Luftbelastung

Die Luftbelastung ist positiv korreliert mit dem Energieverbrauch der Methoden. Der hohe CO₂-Ausstoss der thermischen Verfahren beruht vor allem auf dem hohen Propangas- und Dieselverbrauch. Ähnlich schlechte Verhältnisse zeigen die andern untersuchten Schadstoffe. Bei den Berechnungen der Schadstoffe (CO, SO₂, Kohlenwasserstoffe, NO_x, Partikel) von Atmatzidis (1995) für den thermischen und chemischen Unkrautbekämpfungszug der Deutsche Bahn waren die Verhältnisse immer noch stärker zugunsten des chemischen Verfahrens.

Die mechanischen Varianten lagen bezüglich CO₂-Ausstoss zwischen den thermischen und chemischen Verfahren, die anderen Emissionen waren ungefähr gleich gross wie bei den thermischen Methoden.

Über Luftbelastungen durch Pestizide liegen momentan relativ wenig Untersuchungen vor. Aufgrund des sehr niedrigen Dampfdrucks der hier verwendeten Stoffe sind jedoch nach heutigem Wissensstand keine nennenswerte Luftbelastungen zu erwarten. Einzig das Bodenherbizid Dichlobenil weist einen sehr hohen Dampfdruck auf. Untersuchungen des Herstellers zeigten aber, dass verdampfter Wirkstoff sehr rasch photolytisch abgebaut wird und so ebenfalls keine Gefährdung der Luft vorliegen sollte (Solvay-Duphar 1995).

Gewichtet man die Stoffflüsse, so sind es vor allem NO_x und die Partikel, welche die grösste Luftbelastung verursachen. Die hohen emittierten Mengen an CO₂ wurden aufgrund unserer Bewertungsmethode nicht als sehr problematisch eingestuft (Tab. 19).

4.4 Boden- und Wasserbelastung

Die mechanischen Geräte hatten einen relativ grossen Verschleiss der Werkzeuge. Nach 50 - 150 Einsatzstunden muss jeweils ein Tellerbesen ausgewechselt werden, dabei werden je nach Besentyp ca. 15 kg Stahlborsten zu Staub verrieben. Daher stellt sich die Frage nach einer Belastung von Boden und Wasser durch diesen Stahlborsten-Staub. Recherchen bei zwei Besenherstellern haben ergeben, dass die Stahlborsten der eingesetzten Besen aus Eisen (Fe), Kohlenstoff (C), Mangan (Mn), Phosphor (P), Schwefel (S) und Silizium (Si) bestehen (Weber 1993). Die verwendeten Metalle Fe und Mn sind die zwei häufigsten Schwermetalle der Erdkruste, alle Elemente kommen in Böden natürlicherweise vor. Werden andere Legierungen oder Kunststoffborsten verwendet, so ist die Möglichkeit einer Kontamination von Boden und Abflusswasser mit problematischeren Elementen neu zu überprüfen.

Nach heutigen Erkenntnissen ist eine Verwendung der oben erwähnten Stahlborsten bzgl. der anfallenden Staubpartikel durch den Besenabrieb als unproblematisch einzustufen.

Herbizide Wirkstoffe sind wegen ihrer Mobilität und Persistenz sehr unterschiedlich umweltgefährdend. Die untersuchten Bodenherbizide Dichlobenil, Oryzalin, Prosulfocarb und Flurochloridon sind alle bedeutend

weniger mobil als der früher verwendete Wirkstoff Atrazin (Tab. 16). Diese Stoffe sind zudem weniger persistent als Diuron, das z.B. in der BRD und in Holland an Strassen ein Hauptprodukt ist, in der Schweiz für den nichtlandwirtschaftlichen Bereich aber nicht mehr zugelassen ist. Das Leaching-Potential (Produkt von Mobilität und Persistenz) der in den vorliegenden Versuchen eingesetzten Bodenherbizide ist demzufolge als bedeutend geringer einzustufen als dasjenige von Atrazin und Diuron.

Die beiden mituntersuchten Blattherbizide Glyphosate und Glufosinat werden im Boden ungefähr gleich schnell abgebaut. Glyphosate ist aber viel weniger mobil als Glufosinat (Tab. 16). Die Untersuchungen mit Glyphosate auf Kiessand zeigten, dass bei einer 20-fachen Überdosierung ("worst case") und neunmaliger Applikation (in neun Monaten) kein Glyphosate im Sickerwasser nachgewiesen werden konnte (Anhang C). Die sehr geringen Konzentrationen auch des ersten Metaboliten von Glyphosate, AMPA, lassen den Schluss zu, dass bei vorschriftsgemässer Applikation keine Grundwassergefährdung durch Leaching besteht. Das dürfte auch bei den ungünstigen Adsorptionsbedingungen des Bankettes mit einer zudem noch niedrigen biologischen Aktivität zutreffen (vgl. auch Berechnungen in Tab. 19).

Ein möglicher Oberflächenabfluss von Herbiziden oder Erosionsereignisse müssten gesondert betrachtet werden.

Die Herbizide stellen in unseren Untersuchungen eine Bodenbelastung dar; die beiden Bodenherbizide Dichlobenil und Oryzalin sogar eine gewisse Wasserbelastung (Tab. 19). Die zugrundeliegenden Daten sind aber noch mangelhaft (Tab. 19), deshalb sind diese Resultate mit Vorsicht zu verwenden. Aus der Literatur sind auch keine ähnlichen Vergleiche bekannt. Untersuchungen aus dem Landwirtschaftsbereich liegen von Jolliet (1993) vor, wobei er dieselbe Methodik verwendete. In anderen Bewertungsmethoden (Ahbe et al. 1990; Habersatter und Widmer 1991) werden die Pestizide nicht berücksichtigt, somit ist durch die Anwendung verschiedener Methoden auch kein genauerer Vergleich möglich. Vor allem für die Herbizide wären entsprechende Untersuchungen nötig.

Ganz andere Verhältnisse herrschen im Einsatzbereich der Wasserrinne. Hier eingesetzte Herbizide bilden wegen einer möglichen Abschwemmung vor allem eine potentielle Gefahr für das Oberflächenwasser. Das Sickerverhalten im Boden ist in diesem Anwendungsbereich weniger entscheidend, da der grösste Teil wasserundurchlässiger Belag oder Granitstein ist. Eine geringere Gefahr für diesen Bereich bilden rasch abbaubare Herbizide, die z.B. photolytisch zersetzt werden. Auch aus Gründen der Applikationstechnik (Übergang Fahrbahn Abschlussstein Fuge nur ca. 0.5 - 3 cm breit) sind somit Bodenherbizide hier nicht einsetzbar.

Blattherbizide dagegen können - sorgfältige Arbeit vorausgesetzt - gezielt auf die vorhandenen, entwickelten Pflanzen appliziert werden. Allerdings ist eine vollständige Aufnahme des applizierten Produktes durch die Pflanzen nicht möglich. So ist die Gefahr gross, dass auch eine gewisse Menge des ausgebrachten Herbizides auf den Belag oder auf den Abschlussstein gelangt. Da gemäss StoV das Ausbringen von Herbiziden auf Hartbeläge verboten ist, müssten für diese Problembereiche spezielle Applikationstechniken erprobt werden.

Das Verhalten der Stoffe in solchen Situationen bedarf näherer Abklärungen. Theoretische Überlegungen können Anhaltspunkte liefern, dass durch extreme Verdünnungseffekte schon auf der Strasse die möglichen Kontaminationen von Vorfluterwasser eher gering sein sollten. Durch die Mischung des kontaminierten

Wassers im Vorfluter mit anderen unbehandelten Abflussgewässern ergibt sich eine weitere Verdünnung. Aus der Literatur sind keine Messungen von Herbiziden in Vorfluterwasser bekannt. Meist wurden Schwermetalle und andere durch den Verkehr bedingte Stoffgruppen analysiert (Klein 1982; Golwer und Schneider 1983a; Golwer und Schneider 1983b; Smith und Kaster 1983; Ellis et al. 1986; Grottke 1986; Hamilton et al. 1986; Hernandez Munoz und Hontoria Garcia 1986; Lord 1986; Maestri und Byron 1986; Warren und Birch 1986; Yousef et al. 1986; Sieker und Grottke 1987; Zior 1987; Hahn und Xanthopoulos 1990; Herrmann et al. 1992; Kern et al. 1992; Krejci et al. 1992; Xanthopoulos und Hahn 1992; Yousef und Yu 1992).

Untersuchungen zur Kontamination von Gewässern durch Herbizide finden sich für Grund-, Oberflächen- und Niederschlagswasser z.B. bei Sieker und Grottke (1987); Reupert und Plöger (1989); Buser (1990); Pawlizki (1990); Oberwalder (1992); Rick (1993).

Für die thermischen Verfahren sind keine direkten Belastungen von Boden oder Wasser bekannt.

4.5 Nebenwirkungen auf Fauna und Flora

Die Beeinflussung der Flora wurde in Teil 2 ausführlich beschrieben. Unerwünschte Nebenwirkungen auf benachbarte Pflanzen durch die verschiedenen Verfahren sind vor allem bei den chemischen und thermischen Verfahren möglich. So kann es bei den chemischen Verfahren durch Wind zu Abtrift kommen, was Schäden auslösen kann. Die thermischen Geräte können durch das seitliche Aufsteigen von heisser Luft Schäden an benachbarten Pflanzen verursachen. Beide Probleme sind vor allem auf unsachgemässen Einsatz der Geräte zurückzuführen. Sie traten in unseren Versuchen nie auf.

Nebenwirkungen von Pestiziden auf die Fauna: Aus der Literatur sind für diverse Wirkstoffe Beeinträchtigungen der Fauna bekannt (Domsch 1992). Direkte ökotoxikologische Untersuchungen werden bei der Registration und Zulassung von Amtes wegen gefordert. Wirkstoffe mit erkannten unerwünschten Nebenwirkungen werden entweder nicht zugelassen oder bekommen entsprechende Anwendungseinschränkungen, so dass bei vorschriftsgemässer Anwendung nach heutigem Stand des Wissens keine nennenswerte irreversible Nebenwirkungen auf die Fauna zu erwarten sein sollten.

Nebenwirkungen von thermischen und mechanischen Verfahren auf die Fauna: Untersuchungen von Rahmann und Hollnaicher (1989) und Geissen-Broich (1995) zeigen, dass die thermische Unkrautbekämpfung keine irreversiblen Auswirkungen auf die Individuenzahlen der Makrofauna (Käfer, Ameisen, Spinnen, Würmer, etc.) hat.

Im Boden wurden Temperaturerhöhungen von wenigen Graden gemessen, was die meisten Bodenlebewesen ohne weiteres überstehen können. Individuen an der Bodenoberfläche wurden dagegen stark beeinträchtigt, durch die Wanderbewegungen der meisten Lebewesen kommt es aber schnell wieder zu einer Neubesiedlung. Gleiche Beeinträchtigungen der oberirdischen Fauna sind durch Mähwerke mit automatischer Absauganlage zu erwarten (Wasner 1984; Hemmann et al. 1987; Wasner 1987; Grosskopf 1988; Müller und Steinwarz 1988).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass irreversible, unerwünschte Nebenwirkungen auf die im Boden lebenden Individuen bei keiner Methode zu erwarten sind. Lebewesen, welche sich an der Bodenoberfläche aufhalten, können aber vor allem durch thermische und mechanische Verfahren kleinräumig stark geschädigt werden. Dank der geringen Behandlungsbreite des Bankettes dürften sich die Methoden aber kaum negativ auf die Populationsgrösse auswirken.

4.6 Schlussfolgerung

Jede Methode weist bzgl. ihres Umweltverhaltens Vor- und Nachteile auf. Eine allgemein akzeptierte Methodik zur Bewertung dieser unterschiedlichen Auswirkungen existiert heute nicht. Die Resultate der vorliegenden Studie zeigen, dass unter aktuellen Gegebenheiten eine gezielte Blattherbizid-Anwendung (z.B. mit Glyphosate) an Problemstellen aus ökologischer Sicht sinnvoller sein kann als eine physikalische Methode. Der Grund liegt beim hohen Energieaufwand für die physikalischen Methoden. Durch technische Fortschritte an den thermischen Geräten (höhere Arbeitsgeschwindigkeiten, geringerer Gasverbrauch durch bessere Luftführung) ist es aber durchaus möglich, dass diese Geräte in Zukunft in einer gesamt-ökologischen Bewertung besser abschneiden. Mechanische Verfahren sind in Kombination mit der regelmässig durchgeführten Strassenreinigung aus ökologischer Sicht zu befürworten, da keine zusätzlichen Fahrten nötig sind und das anfallende Material direkt mit der Strassenkehrmaschine aufgesogen werden kann. Der vorbeugenden Reinigung der Strasse und dem regelmässigen Mähen der Bankette kommt besondere Bedeutung zu, helfen diese Massnahmen doch, künftige Unkrautprobleme zu vermeiden.

5. Zusammenfassung

Ziel dieses Kapitels ist die Darstellung wichtiger ökologischer Auswirkungen der verschiedenen Unkrautbekämpfungs-Methoden. Mittels Labor- und Freiland-Untersuchungen wurden Material- und Energieaufwand der Verfahren sowie ausgewählte wichtige Parameter des Umweltverhaltens von Herbiziden unter den speziellen Verhältnissen des Strassenrandes erhoben.

Untersuchungen betreffend Auswaschung von Glyphosate zeigen, dass dieser Wirkstoff und sein erstes Abbauprodukt bei sachgemässer Anwendung keine Gefährdung für das Grundwasser darstellen. Möglicher Oberflächenabfluss auf dem Belag muss bei einem Einsatz in der Wasserrinne verhindert werden. Neben der Wassergefährdung sind vom Herbizideinsatz an Strassen keine weiteren nachteiligen Nebenwirkungen zu erwarten. Der Gefährdungskatalog ist nicht vergleichbar den feldbaulich genutzten Böden.

Physikalische Methoden sollten am Strassenrand ebenfalls keine irreversiblen negativen Nebenwirkungen z.B. auf die Fauna aufweisen. Der geringe Anteil behandelter Fläche im Vergleich zum ganzen Bankett und allenfalls zur Böschung führen in jedem Fall zu einer raschen Neubesiedlung der behandelten Zone.

Die Energiebilanz fällt deutlich zugunsten der chemischen Verfahren aus: Pro Kilometer behandelten Strassenrandes benötigten sie bei vergleichbarer Unkrautwirkung jährlich bis zu fünfmal weniger Energie als die physikalischen Methoden (direkter Energieverbrauch und graue Energie). Hauptursachen für den

höheren Energieverbrauch der thermischen Verfahren sind der Propangasverbrauch und die grössere Anzahl Behandlungen.

Die Emissionen in Luft, Boden und Wasser wurden aufgrund der Energiebilanz errechnet. Die quantitativ am stärksten ins Gewicht fallende CO₂-Emission ist direkt abhängig vom Energieverbrauch und somit geringer bei den chemischen Verfahren. Auch bei weiteren Luftschadstoffen sowie den in Wasser gelösten anorganischen Stoffen sind die chemischen den physikalischen Methoden überlegen. Am meisten feste Abfälle im Boden fallen bei den mechanischen Verfahren an, bedingt u.a. durch den hohen Einsatz an Fahrzeugen und Geräten. Die Relevanz der im Boden vorübergehend verbleibenden Herbizid-Rückstände ist insbesondere bei Glyphosate nach heutigem Kenntnisstand im Ökosystem Strassenrand ebenfalls gering.

Die Ökobilanzierung der verschiedenen Verfahren ist aus Gründen der Methodik sowie der Akzeptanz der zugrundeliegenden Kriterien und Grenzwerte problematisch. Die Entwicklung objektiver Methoden zur Beurteilung der Umweltauswirkungen ist noch im Fluss. Die eingesetzte Immissionsgrenzwert-Methode zeigte, dass die aggregierte Boden-, Luft-, und Wasserbelastung für die thermischen und mechanischen Verfahren ähnlich hoch sind und für die chemischen Methoden im allgemeinen geringer war.

Die Hauptfrage, ob der gesichert höhere Energieeinsatz physikalischer Methoden oder allfällige Herbizid-Nebenwirkungen aus ökologischer Sicht nachteiliger sind, müsste aufgrund der vorliegenden Ökobilanz zugunsten der chemischen Varianten beantwortet werden.

Teil 5 SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DIE PRAXIS

1. Allgemeines

Mit gezielter Aufklärung und intensiven Diskussionen unter den betroffenen Kreisen aus Strassenplanung, Unterhaltsdienst und Naturschutz wären viele Problemstellen mit Pflanzenbewuchs vermeidbar (vorbeugen!). Wünschbar wäre auch etwas mehr Toleranz gegenüber vorhandener Spontanvegetation an Strassen. Weitaus die meisten Bankette wurden mit Humus bis zu ca. 20 cm angereichert. Auf diesen Unterlagen sollte eine möglichst dichte Grasnarbe mit horstbildenden, mehrjährigen Gräserarten angestrebt werden. Damit wären die besten Bedingungen geschaffen zur Verhinderung einer wirklichen "Verunkrautung": Offener Boden und Lücken im Bestand sind nämlich die Grundlagen für das Auftreten von Problempflanzen. Ein dichter, langsam wachsender Gräserbestand wäre eine Barriere für Problempflanzen und könnte je nach Standort mit zwei bis vier Schnitten pro Jahr mit relativ wenig Zusatzaufwand unterhalten werden.

Toleranz und Ästhetik

- An sehr vielen Stellen könnte ein spontaner Pflanzenbewuchs ohne Beeinträchtigungen toleriert werden.
- Mögliche Problemstellen, die gemäht werden können, sollten möglichst vollständig mit Horstgräsern begrünt sein.
- Unkrautbekämpfung aus rein ästhetischen Gründen sollte vermieden werden.

Bewuchs und Pflege des Bankettes

- Wird von einem anzustrebenden dichten Gräserbestand im Bankett ausgegangen, so verursacht jede Unkrautbekämpfungs-Methode eine unerwünschte Veränderung der Artenzusammensetzung: Die entstehenden offenen Flächen werden durch rasch- und hochwachsende Ruderal- sowie besonders problematische ausläuferbildende Pflanzen besiedelt, die meistens weitere Unkrautbekämpfungs-Massnahmen erfordern.
- Die heute übliche, intensive Bankettpflege mit 2 - 4 Schnitten pro Jahr sollte deshalb beibehalten werden.

Schulung und Pflanzenkenntnisse

- Um Problemstellen richtig einschätzen und eine sinnvolle, angepasste Methode anwenden zu können, müssen Mindestkenntnisse über potentielle Problempflanzen vorhanden sein.
- Eine genaue Instruktion der Mitarbeiter über die verschiedenen Bekämpfungsmethoden und deren optimale Applikationstechnik ist unerlässlich.

Planung und Bau von Strassen

- Bei Planung, Bau und Sanierung von Strassenabschnitten muss potentiellen Problemstellen für einen möglichen Pflanzenbewuchs vermehrt Beachtung geschenkt werden.
- Um ein Einwachsen von Pflanzen zu verhindern, wären Asphaltbelagswülste den 1 m langen Stellplatten vorzuziehen. Pflästerungen mit ihrem noch höheren Fugenanteil ermöglichen noch mehr Pflanzen ein unerwünschtes Einwachsen.
- National- und Kantonsstrassen ohne Randabschluss sind mechanisch gut zu pflegen.
- Bauwerksschäden durch nicht verholzte Pflanzen an National- und Kantonsstrassen wurden nur dann beobachtet, wenn bereits Baumängel vorhanden waren.
- Radwege und Strassen mit geringer Belagsdichte können von einigen ausläuferbildenden Pflanzenarten durchstossen werden (z.B. Seggen *Carex ssp.*). Eine chemische Unkrautbekämpfung wäre nur in Kombination mit baulichen Massnahmen sinnvoll. Thermische oder mechanische Methoden bekämpfen die Problempflanzen nicht nachhaltig.

2. Herbizide

Der Einsatz chemischer Mittel ist primär als Sanierungs-Massnahme punktuell an schwer zugänglichen Stellen und gegen mehrjährige ausläufer- oder pfahlwurzelbildende Problempflanzen sinnvoll. Ein vorbeugender Einsatz schafft dagegen in vielen Fällen durch den offen bleibenden Boden erst die Voraussetzungen für eine Besiedlung mit Problempflanzen. Die Strategie der gezielten Bekämpfung kann nur mit systemisch wirkenden Blattherbiziden verfolgt werden, Bodenherbizide sollen nicht angewendet werden.

Ökonomie und Ökologie

- Herbizide an Problemstellen gezielt eingesetzt sind ökonomisch günstiger als andere Symptombekämpfungs-Massnahmen.
- Eine vorschriftsgemässe punktuelle Applikation von Herbiziden auf vorhandene Blattmasse ist bzgl. Energieverbrauch und Stoffflüssen den thermischen und mechanischen Methoden überlegen; die gesamte ökologische Einstufung hängt stark von der Gewichtung der einzelnen Elemente ab.

Blattherbizide

- Vorhandene Pflanzen - ob ein- oder mehrjährig - wurden mit Glyphosate sehr gut bekämpft. Jedoch setzte innerhalb weniger Wochen nach der Behandlung wieder eine Neukeimung ein. Einer Blattherbizid-Behandlung müssen somit andere Massnahmen folgen, welche die einfach bekämpfbaren Keimlinge und Jungpflanzen in Schach halten.
- Ein optimaler Blattherbizid-Einsatz ist von der Vegetation abhängig. Die zu behandelnden Pflanzen sollten sich in vollem Wachstum befinden und genügend aktive Blattmasse gebildet haben: Gräser ab ca. 20 cm Wuchshöhe und Kräuter ab ca. 6-Blatt-Stadium.
- Die Blattherbizide wirken nicht gegen alle Pflanzen. Die vom Hersteller angegebenen Wirkungslücken sind zu beachten.

- Frühlings- oder Sommerbehandlungen müssen entsprechend der vorhandenen Blattmasse der Unkräuter durchgeführt werden. Eine Herbstbehandlung ist bei speziellen Problempflanzen wie Brombeeren, Schilf, Waldrebe (*Rubus*, *Phragmites*, *Clematis*) wirksamer.
- Optimales Ausbringen von Herbiziden in der ca. 0.5 - 3 cm breiten Rinne zwischen Asphalt und Randstein ist schwierig, da die Gefahr einer möglichen Verschmutzung der Oberflächengewässer besteht. Durch die richtige Wahl des Spritzgerätes und der entsprechenden Düsen kann diese Gefahr eingeschränkt werden.

Bodenherbizide

Eine flächige Bodenherbizid-Anwendung sollte das Bankett an sich während der ganzen Vegetationsperiode bewuchsfrei halten. Unabhängig von der Fragwürdigkeit dieser Zielsetzung ist dies mit den heute in der Schweiz verfügbaren Wirkstoffen, die ein tolerierbares Umweltverhalten aufweisen würden, nicht mehr möglich. Neue Wirkstoffe können somit heute nicht empfohlen werden.

- Eine vorsorgliche Behandlung im März oder April brachte nicht die gewünschte Wirkung, denn die sommer- und herbstkeimenden Arten wurden nicht mehr erfasst. Somit wären entweder zwei bis drei reine Bodenherbizid-Applikationen oder sehr hohe Dosierungen nötig, um das Bankett ganzjährig unkrautfrei zu halten. Beides ist von der Umweltgefährdung her mit den aktuell in der Schweiz bewilligten Wirkstoffen weder erlaubt noch erwünscht.
- Falls im Bankett bereits Pflanzen vorhanden waren, mussten die verfügbaren Bodenherbizide mit Blattherbiziden kombiniert werden.
- Ein lückenloser Herbizidfilm soll den Boden versiegeln. Wenn bei der Applikation eine Mulchmasse vorhanden war, reduzierte sich die Wirkung dadurch erheblich.
- Das Umweltverhalten ist in Bezug auf die Adsorption und damit die Aus- und Abwaschgefahr unmittelbar am Strassenrand bedeutend problematischer als auf normalen, bewachsenen Böden.
- Vorsorgliche Applikationen von Bodenherbiziden in die Rinne zwischen Fahrbahnbelag und Randstein sind aus ökologischer Sicht zu vermeiden, da die Gefahr einer möglichen Verschmutzung der Oberflächengewässer besteht. Einzelne Problempflanzen sind mit Blattherbiziden ökologisch unbedenklicher zu bekämpfen.

3. Mechanische Methoden

Geräte mit Tellerbesen wären gut mit der regelmässigen Strassenreinigung kombinierbar. Je nach vorhandenem Bewuchs und Problemstellen können verschiedene mechanische Geräte eingesetzt und mit chemischen oder thermischen Verfahren kombiniert werden. Eine rein mechanische Unkrautbekämpfung wäre jedoch nur zur Verhinderung von Neuverunkrautungen sinnvoll. Zur Bekämpfung mehrjähriger Problemunkräuter ist sie aus biologischen und ökonomischen Gründen nicht optimal. Ein Einsatz ist nur auf befestigten Flächen möglich.

Vorsorgliche Massnahmen im Bankett: Abranden

Wirkung

- Das Abranden der ersten 5 - 15 cm des Bankettes mit Pflug oder Drahtseilbesen ist sehr effektiv. Eine solche Massnahme ist nur alle drei oder mehr Jahre notwendig. Sie ist nur bedingt vergleichbar mit andern Unkrautbekämpfungs-Methoden, da sie die Wachstumsbedingungen für die Pflanzen unmittelbar am Strassenabschluss durch den Entzug des humosen Materials nachhaltig verschlechtert. Dadurch kann der Effekt der zusätzlichen direkten Bekämpfungsmassnahmen erhöht werden.

Arbeits-, Material- und Energieaufwand

- Abranden ist mit einem beträchtlichen Arbeits-, Material- und Energieaufwand verbunden, der jedoch auf mehrere Jahre verteilt werden kann.

Betriebliche Aspekte und Sicherheit

- Für Signalisation und Materialabtransport ist ein relativ grosser Aufwand nötig.
- Je grösser die Anzahl der beteiligten Personen und Fahrzeuge, desto höher ist die potentielle Unfallgefahr.

Massnahmen in befestigten Rinnen: Unkrautbesen

Wirkung

- In Rinnen wirkten die geprüften Unkrautbesen gut gegen neugekeimte Jungpflanzen. Etablierte Mehrjährige konnten wieder austreiben. Somit eignet sich die Methode dort gut, wo mehrjährige Problemunkräuter vorgängig eliminiert wurden.
- 2 - 4 Behandlungen pro Jahr reichen für eine nachhaltige Reduktion des neu aufgelaufenen Pflanzenbewuchses in der Rinne aus.

Arbeits-, Material- und Energieaufwand

- Das Verfahren ist gut kombinierbar mit der regelmässigen Strassenreinigung; im Vergleich zur normalen Reinigung ist die Arbeitsgeschwindigkeit aber reduziert.

Betriebliche Aspekte und Sicherheit

- Die Bedienung der Geräte und ein gleichzeitiges Wischen der Strasse ist für das Personal relativ anspruchsvoll. Die Überwachung des Unkrautbesens und des Reinigungsvorganges wäre mit etwas Übung machbar.
- Je nach Strassenrandabschluss müssen verschiedene Besentypen verwendet werden.
- In Kombination mit der Strassenreinigung wäre das Unfallrisiko nur minimal erhöht.

4. Thermische Methoden

Thermische Verfahren könnten auf unbefestigten Flächen (z.B. Kies) mit einjährigen Samenunkräutern optimal eingesetzt werden. Nach der Sanierung einer Problemfläche mit Blattherbiziden gegen etablierte mehrjährige Unkräuter oder baulichen Massnahmen kann neuauftkommende Vegetation zerstört werden. Wenig geeignet ist die Methode zur Bekämpfung etablierter Pflanzen mit Reserve- und Wiederaustriebsorganen (vgl. Unkrautbesen in der Rinne).

Wirkung

- Gute Wirkung gegen frisch aufgelaufene Pflanzen, die mit 2 - 4 Behandlungen pro Jahr ausreichend bekämpft werden.
- Durch die Arbeitsbreiten von 0.4 - 0.8 m ist eine gleichzeitige Behandlung von Rinne und Bankett möglich. Eine gute Nährstoffversorgung im Bankett verhindert jedoch eine ausreichende Wirkung der Methode. Durch die Behandlung des Bankettes werden dort ausläuferbildende, mehrjährige Arten gefördert.

Arbeits-, Material- und Energieaufwand

- Der Propangasverbrauch und die relativ langsame Arbeitsgeschwindigkeit, verbunden mit wiederholten Anwendungen ergeben einen beträchtlichen, alljährlich anfallenden Arbeits- und Energieaufwand. Die dadurch resultierenden Luftemissionen sind aus ökologischer Sicht nicht unbedenklich.

Betriebliche Aspekte und Sicherheit

- Die Methode kann von der baulichen Seite her überall eingesetzt werden; Anwendungseinschränkungen ergeben sich nur bzgl. der Witterung.
- Wo relevant, erreicht man mit entsprechenden Geräten eine gute Flächenleistung.
- Durch die hohe Anzahl Behandlungen sind die Aufenthaltszeiten an den Strassen relativ gross, entsprechend erhöht sich auch das Unfallrisiko.
- Handhabung, Lagerung und Transport von Propangas erfordern gewisse Sicherheitsvorkehrungen.

5. Kombination der Massnahmen

Wie an mehreren Stellen im vorliegenden Bericht begründet, ist eine Kombination verschiedener Methoden anzustreben. Rein chemische, mechanische oder thermische Unkrautbekämpfungs-Methoden an Strassen wären machbar, sind aber unter wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten nicht sinnvoll. Die einmalige Beseitigung von etablierten mehrjährigen Unkräutern ist aus unserer Sicht ökologisch und ökonomisch am effektivsten mit einem gezielten Blattherbizid-Einsatz zu erreichen. Anschliessend kann mit mechanischen oder thermischen Methoden neu aufkommender störender Bewuchs erfolgreich bekämpft werden. Dank diesem kombinierten Einsatz wird auch der höhere Arbeits-, Material- und Energieaufwand letzterer Verfahren etwas relativiert. Alle Unkrautbekämpfungs-Methoden müssen mit pflegerischen und baulichen Massnahmen koordiniert und ergänzt werden.

Entsprechend der vorhandenen Vegetation können verschiedene Kombinationen gewählt werden.

Grundsätzlich sollten die Rinnen im Frühjahr (eventuell auch im Herbst) mechanisch von Humus gereinigt werden. Sollten sich aus irgendwelchen Gründen trotz Vorsorge mehrjährige pfahlwurzel- oder ausläuferbildende Arten etablieren können, wäre eine chemische Behandlung der Problempflanzen vertretbar. Alle anderen Arten, welche aus Samen bis im Sommer oder Herbst keimen, könnten optimal mit einer kombinierten Strassenreinigung mit Unkrautbesen oder an schlecht zugänglichen Orten mit einer thermischen Methode bekämpft werden.

Besiedeln nur einjährige Arten die Wasserrinne, so könnte meist ganz auf eine Behandlung verzichtet werden, allenfalls würden 1 - 3 Einsätze (vor der Samenbildung) mit mechanischen oder thermischen Methoden genügen.

Teil 6 AUSBLICK

In dieser Arbeit werden verschiedene Massnahmen zur Unkrautbekämpfung eingehend untersucht, verglichen und bewertet. Trotz einiger Lücken in Bezug auf eine objektive Bewertung der Umwelteinflüsse sind Aussagen möglich. Die jetzt seit einigen Jahren laufenden Diskussionen über international konsensfähige Bewertungsmodelle der ökologischen Auswirkungen verschiedener Verfahren sollten aufmerksam verfolgt werden.

Die Kernfrage, wie allfällige unerwünschte Nebenwirkungen von Herbiziden auf die belebte Umwelt und den Menschen im Verhältnis zum hohen Energieverbrauch und den daraus resultierenden Belastungen primär der Luft bei den thermischen Verfahren zu gewichten ist, konnte nicht abschliessend beantwortet werden, da die Zielsetzung der Unkrautbekämpfung an Strassen sich im Laufe des Projektes etwas verändert hat:

Anstelle einer ganzflächigen streifigen Behandlung des unmittelbar an den Belag angrenzenden Bankettbereichs scheint heute die Wasserrinne und allfällige Problemstellen mit unerwünschtem Bewuchs relevant. Die jetzt seit einigen Jahren laufenden Diskussionen über international konsensfähige Bewertungsmodelle sollten aufmerksam verfolgt werden.

Ein gezielter **Blattherbizid-Einsatz an Problemstellen** im ganzen Strassennetz ist aus biologischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gründen empfehlenswert. Der Einsatz von Bodenherbiziden an Strassen und Plätzen sollte aufgrund des heutigen Wissenstand in Zukunft ganz untersagt werden (vgl. Teil 5 Schlussfolgerungen). Dies könnte auch das heute noch bewilligte Dichlobenil mit einbeziehen. Die getesteten neuen Bodenherbizide zeigten nicht die gewünschten Eigenschaften für einen sinnvollen Einsatz am Strassenrand. Ein gezielter Blattherbizid-Einsatz (z.B. mit Glyphosate und Glufosinat) kombiniert mit einem Gesamtkonzept zur Unkrautbekämpfung an Strassen dürfte auch in Zukunft die beste Lösung sein.

Die heutigen Grundlagenkenntnisse sollten nun in der Praxis umgesetzt werden können. Dies erfordert entsprechende Schulung, Interesse und Engagement aller betroffenen Kreise. Dazu benötigte Entscheidungshilfen und Führungsinstrumente sollten noch erstellt oder ergänzt werden.

Zukünftige Untersuchungen müssen vermehrt vorbeugende Massnahmen wie optimale Bankettbegrünung, Pflege des Bankettstreifens und bauliche Massnahmen einbeziehen. Reine Unkrautbekämpfung (Symptombekämpfung) könnte dadurch reduziert und künftige Probleme frühzeitig erkannt werden. Die Diskussion des Einflusses unerwünschter Pflanzen am Strassenrand wird erschwert durch die Tatsache, dass Daten zur effektiven Schadwirkung von Pflanzen am Bauwerk (Schadensschwelle) und zur möglichen Gefährdung der Sicherheit fehlen (Toleranz). Zur Beurteilung der aktuellen Unkrautbekämpfungs-Methoden könnte die folgende Tabelle eine erste Entscheidungshilfe bieten.

Politische und gesellschaftliche Auflagen, wie auch Diskussionen in Gewässer- und Umweltschutzkreisen, bilden in Zukunft wichtige Herausforderungen für den Strassenbau.

Tabelle 20: Entscheidungshilfe zur ökonomischen und ökologischen Beurteilung verschiedener Unkrautbekämpfungs-Massnahmen entsprechend ihrer biologischen Wirkung im Bankettbereich (unten) oder der Wasserrinne (nächste Seite). Zusätzliche Aspekte der Sicherheit und möglicher Betriebsstörungen sind entsprechend dem Einsatzort (Mittelstreifen, Bankett) ebenfalls zu berücksichtigen (Tab. 12). Die ökologische und ökonomische Bewertung der Verfahren ist relativ zueinander. Ziele und Wirkung wurden nicht gewichtet und beziehen sich nur auf die Methode.

Ausgangsvegetation Probleme	Ziel / Wirkung (Ohne Bewertung)	mögliche Massnahmen	ökonomisch	ökologisch	zu erwartende Probleme	Unfallgefahr/ Betriebsstörungen (Mittelstreifen)
vorwiegend Samenunkräuter	kein Bewuchs	thermisch	mittel	mittel	ausläuferbildende Pflanzen	gross/mittel
	kein Bewuchs	Seilbesen	mittel	mittel	ausläuferbildende Pflanzen, Samenunkräuter	mittel/gering
	Humusabtrag, Einwachsen verhindern, kein Bewuchs	Abranden	schlecht	mittel	Ausläufer Pflanzen, Samenunkräuter	mittel/gering
	Bewuchs niederhalten, Barriere	mähen	mittel	mittel *	lückigen Bestand -> Problemunkräuter	--
	kein Bewuchs	chemisch, Blattherbizid	sehr gut	gut - **	Samenunkräuter	gering/gering
vorwiegend mehrjährige ausläufer- und pfahlwurzelbildende Arten	kein Bewuchs	chemisch, systemisches Blattherbizid	sehr gut	gut - **	Samenunkräuter	gering/gering
	kein Bewuchs	chemisch + thermisch	gut	mittel	Bodenerosion	mittel/mittel
	kein Bewuchs	chemisch + mechanisch	gut	mittel	Bodenerosion	gering/gering
	dichte Grasnarbe, Barriere	mähen	mittel	mittel *	keine	--
Problempflanzen						
Holzpflanzen	kein Bewuchs	chemisch	sehr gut	gut - **	--	gering/gering
	kein Bewuchs	mechanisch, manuell	mittel	gut	Wurzelrückstände	mittel/gering
einzelne Distel	kein Bewuchs	chemisch	sehr gut	gut - **	offene Stellen	gering/gering
Disteln: mehr als 1 pro m ²	Wuchs unterdrücken, Samenbildung verhindern	mähen	mittel	mittel *	--	--

Ausgangsvegetation Probleme	Ziel / Wirkung (ohne Bewertung)	mögliche Massnahmen	ökonomisch	ökologisch	zu erwartende Probleme	Unfallgefahr/ Betriebsstörungen (Mittelstreifen)
Samenunkräuter	kein Bewuchs	thermisch	mittel	mittel	mehrfährige Arten	gross/mittel
	Humusabtrag, kein Bewuchs	Seilbesen	mittel	mittel	Ausläufer Pflanzen, Samenunkräuter	mittel/gering
	Humusabtrag, kein Bewuchs	Flachstahlbesen	schlecht	mittel	Ausläufer Pflanzen, Samenunkräuter	gross/gross
	kein Bewuchs	chemisch, Blattherbizid	sehr gut	gut - **	Samenunkräuter	gering/gering
vorwiegend mehrjährige ausläufer- und pfahlwurzelbildende Arten	kein Bewuchs	chemisch, systemisches Blattherbizid	sehr gut	gut - **	Samenunkräuter	gering/gering
	kein Bewuchs	chemisch + thermisch	gut	mittel	--	mittel/mittel
	kein Bewuchs, Humusabtrag	chemisch + mechanisch	gut	mittel	--	gering/gering
Problempflanzen						
Holzpflanzen	kein Bewuchs	chemisch	sehr gut	gut - **		gering/gering
	kein Bewuchs	mechanisch, manuell	mittel	gut	Wurzelrückstände	mittel/gering

* persönliche Einschätzung, ohne Daten

** Aufgrund der in Kapitel "Ökologische Aspekte" erwähnten Auswirkungen als "gut" zu Bewerten. Werden in Zukunft politische, gesellschaftliche und neue wissenschaftliche Gesichtspunkte mit einbezogen, müsste die Bewertung möglicherweise angepasst werden.

GLOSSAR

- **Ausläuferpflanzen:** Pflanzen welche oberirdische (Ausläufer/Stolonen: z.B. Faden-Ehrenpreis *Veronica filiformis*) oder unterirdische (Wurzelausläufer: z.B. Acker-Kratzdistel *Cirsium arvense*) vegetative Vermehrungsorgane bilden.
Rhizome: Unterirdische oft horizontal wachsende verdickte Sprosse mit sprossbürtigen Wurzeln, z.B. Quecke *Agropyron repens*.
- **Bankett:** Unmittelbar an die rechte Fahrbahn (oder Standspur) angrenzender, intensiv gepflegter Grünstreifen.
- **Blattherbizid:** Herbizid, das von den oberirdischen grünen Pflanzenteilen aufgenommen wird. Applikation auf die Blätter: Kontaktherbizide töten nur Spross ab (kein Transport in den Pflanzen), systemische Blattherbizide die ganze Pflanze (in Wurzel transportiert).
- **Bodenherbizid:** Herbizid, das über den Boden wirkt; wird auf den Boden appliziert. Die Aufnahme erfolgt über keimende Samen, Wurzeln oder andere unterirdische Pflanzenorgane. Bodenherbizide haben meist eine lange Wirkungsdauer (Residualwirkung).
- **Bonitur/Aufnahme:** Visuelle Schätzung der Bodenbedeckung, die auch ein gewisses Mass an Subjektivität beinhaltet. Die Bodenbedeckung kann für jede Art oder als Summenwert einer Pflanzengruppe erfasst werden.
- **CO₂ (Kohlendioxid):** Farbloses Gas, das bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen, beim biologischen Abbau von Biomasse sowie bei der menschlichen Atmung entsteht. CO₂ ist mit einer Konzentration von ca. 0.04 Vol-% Bestandteil der Atmosphäre; durch vermehrte Verbrennung fossiler Brennstoffe und Brandrodung zunehmend.
- **Dichlobenil:** Organisches Bodenherbizid gegen ein- und mehrjährige Unkräuter. Dichlobenil hemmt das Pflanzenwachstum und besitzt eine starke toxische Wirkung auf keimende Samen und teilungsfähiges Gewebe.
- **Diuron:** Bodenherbizid gegen Unkräuter und Ungräser mit Wirkung gegen Moose und Algen. Diuron hemmt die Photosynthese.
- **Flurochloridon:** Bodenherbizid gegen einjährige Unkräuter und Ungräser. Flurochloridon wird hauptsächlich über die Wurzeln keimender Unkräuter aufgenommen und blockiert die Carotinoid-Synthese.
- **Glufosinat:** Nicht-selektives Blattherbizid mit Kontaktwirkung auf Unkräuter und Ungräser. Glufosinat greift in den Aminosäure-Stoffwechsel ein (Pflanzen vergiften sich selbst durch Ammoniumanreicherung).
- **Glyphosate:** Nicht-selektives systemisches Blattherbizid gegen ein- und mehrjährige Wurzelunkräuter und -gräser. Glyphosate wird mit Hilfe des Saftstromes transportiert und unterbindet die Synthese von essentiellen Aminosäuren in den Pflanzenzellen.

- **Graue Energie:** Herstellungenergie der Maschinen und Geräte

- **Immissions-grenzwert-Methode:** Ökobilanzierungs-Methode: Die Schadstoff-Emissionen werden anhand ihrer Immissionsgrenzwerte gewichtet und die belasteten Gesamtvolumen innerhalb der Luft, Wasser und Boden berechnet; dabei werden Verweildauer und Verteilvolumen der Stoffe berücksichtigt.

- **Leaching-Potential:** Neigung eines herbiziden Wirkstoffes zur Verlagerung in tiefere Bodenschichten. Diese Verlagerung ist abhängig von verschiedenen Faktoren:
 - 1. Sorptionseigenschaften des Bodens und des Wirkstoffs
 - 2. Abbaugeschwindigkeit (Persistenz) des Wirkstoffs
 - 3. Wasserlöslichkeit des Wirkstoffs
 - 4. Boden passierende Wassermenge (Jahreszeit)
 - 5. Applizierte Wirkstoffmenge
 - 6. Formulierung der Wirkstoffe.

- **Metabolit:** Abbauprodukt eines herbiziden Wirkstoffes

- **mulchen:** Abschlagen von Pflanzen mit rasch rotierenden, beweglichen Eisenteilen (Kette oder Schlegel)

- **NO_x (Stickstoffoxide):** Sammelbegriff für die Gase NO, NO₂, N₂O und N₂O₅. NO_x werden in Verbrennungsprozessen durch Oxidation des im Brennstoff enthaltenen Stickstoffs und durch Reaktion von Luftstickstoff mit Luftsauerstoff gebildet. Sie sind an der Bildung des sauren Regens und, unter starker Sonneneinstrahlung, an der Bildung des photochemischen Smogs (z.B. Ozon) beteiligt.

- **Oryzalin:** Selektives Bodenherbizid gegen Gräser und verschiedene einjährige Unkräuter. Hemmt Keimung.

- **Persistenz:** Ausdruck für die Lebensdauer einer Verbindung in einem bestimmten Medium. Häufig in Zusammenhang mit dem Abbau von Herbiziden im Boden verwendet. Im allgemeinen werden Herbizide mit Halbwertszeiten von < 0.5 Monaten als wenig persistent und solche mit Halbwertszeiten >1.5 Monaten als sehr persistent bezeichnet.

- **Pfahlwurzelbildende:** Pflanzen, welche durch eine starke Förderung der Hauptwurzel gegenüber den Nebenwurzeln eine verdickte Hauptwurzel besitzen, z.B. Gemeiner Löwenzahn *Taraxacum officinale* (mit eingelagerten Reservestoffen für die Sprossentwicklung in der nächsten Vegetationsperiode oder nach einer Zerstörung des Sprosses durch eine Unkrautbekämpfungs-Massnahme).

- **Phenylharnstoffe:** Bodenherbizide, welche die Photosynthese hemmen, z.T. sehr persistent (z.B. Diuron).

- **Prosulfocarb:** Bodenherbizid gegen Gräser und breitblättrige Unkräuter. Prosulfocarb hemmt die Biosynthese von Fettsäuren.

- **sommerannuelle:** Sommerkeimende Pflanzen welche, vorwiegend in spätgesäten Kulturen wie Mais, Gemüse, etc. vertreten sind (z.B. Hirsearten).

- **Stolonen:** vgl. Ausläuferpflanzen

- **Systemisches Herbizid:** Im Saftstrom der Pflanze transportierbare Wirkstoffe. (Auch translozierbare Herbizide genannt).

- **Triazine:** Bodenherbizide, welche die Photosynthese hemmen. Die in der Schweiz meistverwendeten Atrazin, Simazin und Terbuthylazin wirken in den be-
willigten Maximaldosierungen praktisch nur gegen keimende Unkräuter.
- **vernalisieren:** Kältereiz, der die Keimruhe diverser Pflanzen brechen kann.
- **Wasserrinne, Rinne, Fuge:** In der vorliegenden Arbeit wird der Übergang Fahrspur - Abschlussstein als Wasserrinne (Rinne) bezeichnet. Darin enthalten ist die Fuge zwischen den zwei unterschiedlichen Materialien und falls vorhanden wasserführende Vertiefungen durch nicht bündig an den Abschlussstein geteerte Deckbeläge. Dieser Bereich kann mehrere cm breit sein.

Wasserschalen und wasserführende befestigte Rinnen (breiter als ca.15 cm) wurden nicht untersucht.
- **Wirkungsgrad:** Gibt den Erfolg einer Behandlungsmethode an, meistens als %-Wirkung. Für verschiedene Versuchsbedingungen stehen mehrere Formeln zur Verfügung. Bsp.: Wirkungsgrad von 90 % heisst, durch die Behandlung wurden im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle 90 % der vorhandenen Pflanzen eliminiert.
- **Wirkungsspektrum:** Gesamtheit aller von einer Unkrautbekämpfungs-Methode erfolgreich be-
kämpfbaren Pflanzenarten.

DANK

Dank der Unterstützung verschiedenster Personen und Institutionen konnte die vom Bundesamt für Strassenbau in Auftrag gegebene Forschungsarbeit in den Jahren 1992 bis 1995 durchgeführt werden. Dies waren namentlich die Eidg. Forschungsanstalt Wädenswil, an welcher die gute Infrastruktur benutzt werden durfte. Allen Mitarbeitern, Kollegen und Bekannten, welche die Arbeit mit Rat und Tat unterstützten, soll an dieser Stelle ein besonderes Dankeschön ausgesprochen werden.

Rolf Wacker (FAW) führte die Analysen der zahlreich anfallenden Herbizidproben durch und in Zusammenarbeit entstanden die Mobilitätsuntersuchungen von Glyphosate (Anhang C). Im Teil 5 "Ökologische Aspekte" konnte auf die Unterstützung von Olivier Jolliet (ETH Lausanne) gezählt werden. Wertvolle Resultate und Ideen erhielten wir auch von den Christian Müller und Helmut Kuppelwieser (SBB). Für die kritische Durchsicht des Manuskriptes danken wir Jeannine Bossert.

Ohne die tatkräftige Mitarbeit des Personals der Unterhaltsdienste Wädenswil (N3), Mels (N3/N13), Buchs (SG) und Adliswil (ZH) sowie den freundlicherweise von den Firmen zur Verfügung gestellten Geräten hätten die Versuche nie in diesem Umfang durchgeführt werden können.

Kompetente Beratung und Anregungen erhielten wir auch von den Mitgliedern der VSS - Kommissionen 274-4 und 274.

LITERATURVERZEICHNIS

- Ahbe, S., Braunschweig, A. und Müller-Wenk, R. (1990). Methodik für Ökobilanzen - auf der Basis ökologischer Optimierung. In: Schriftenreihe Umwelt. Nr. 133 Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 39 S.
- Albrecht, E. (1985). Umweltneutrale Massnahmen zur Beseitigung von unerwünschtem Bewuchs auf befestigten Flächen. Dissertation Technische Universität Berlin.
- Ammon (1994), persönliche Mitteilungen.
- Ascard, J. (1994). Dose-response models for flame weeding in relation to plant size and density. *Weed Research* 34: 377-385.
- Ascard, J. (1995). Thermal weed control by flaming: Biological and technical aspects. Diss. Swedish University of Agricultural Sciences, Departement of Agricultural Engineering.
- Atmatzidis, E., Behrendt, S., Kreibich, R. und Seidemann, T. (im Druck). Ökologischer Vergleich der Verfahren zur Vegetationskontrolle bei der Deutschen Bahn AG unter Berücksichtigung von Kostenberechnungen. Endbericht Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT).
- Augustin, B. (1990). Biologische Wirkung, Wirtschaftlichkeit, Handhabung und Umweltverträglichkeit von Infrarotstrahlen zur Unkrautbekämpfung im kommunalen Bereich. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 12: 447-453.
- Baier, C., Hurle, K. und Kirchhoff, J. (1985). Datensammlung zur Abschätzung des Gefährdungspotential von Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffen für Gewässer. Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- Banks, P. A. und Robinson, E. L. (1984). The fate of Oryzalin applied to straw-mulched and nonmulched soils. *Weed Science* 32: 269-272.
- Beck, M., Ed. (1993). Ökobilanzierung im betrieblichen Management. Vogel Buchverlag, Würzburg.
- Bertram, A. und Meyer, J. (1993). Measurement of heat transfer in thermal weed control. I.F.O.A.M., Dijon.
- Braun-Blanquet, J. (1964). Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde. Wien.
- Braunschweig, A. und Müller-Wenk, R. (1993). Ökobilanzen für Unternehmungen - Eine Wegleitung für die Praxis. Paul Haupt Verlag, Bern.
- Bundeskanzlei (1986). Stoffverordnung (StoV). In: Verordnung über umweltgefährdende Stoffe. 814.013 Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, Bern. Ed. 1. April 1991, 90 S.
- Buser, H., Klein, A. und Baggenstos, M. (1988). Pflegerichtlinien für Grünflächen an Strassen. In: Pflegerichtlinien für Grünflächen an Strassen. Tiefbauamt des Kantons Basel-Landschaft, Liestal. 51 S.
- Buser, H.-R. (1990). Atrazine and other s-triazine herbicides in lakes and rain in Switzerland. *Environmental science and technology* 24(7): 1049-1058.
- BUWAL (1992). Die Bedeutung der Immissionsgrenzwerte der Luftreinhalte - Verordnung. In: Schriftenreihe Umweltschutz. Nr. 180 Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 59 S.
- Daar, S. (1994). Integrated approaches to roadside vegetation management. *IPM Practitioner* 16(9): 1-9.
- DFG (1990). Mitteilung XVI der Kommission für Pflanzenschutz-, Pflanzenbehandlungs- und Vorratsschutzmittel. In: Pflanzenschutzmittel im Trinkwasser - Analytik, toxikologische Beurteilung und Strategien zur Minimierung des Eintrages. VCH, Weinheim. 1-77 S.

- Domsch, K. H. (1992). Pestizide im Boden: mikrobieller Abbau und Nebenwirkungen auf Mikroorganismen. In: Pestizide im Boden: mikrobieller Abbau und Nebenwirkungen auf Mikroorganismen. VCH, Weinheim.
- Ebeling, J. (1993), persönliche Mitteilungen.
- Egli, N. (1994). Ökobilanzen: Grundlagen und Grenzen. BUWAL Medienspiegel, Abfall-Wissen 49+50: 111-118.
- EKAS (1990). Behälter, Lagern, Umschlagen und Abfüllen. In: Flüssiggasrichtlinien. Teil 1 Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA), Luzern. Ed. Jan.1990, 32 S.
- Ellis, J. B., Revitt, D. M., Harrop, D. O. und Beckwith, P. R. (1986). The contribution of highway surfaces to urban stormwater sediments and metal loadings. Highway pollution, London, The Science of the Total Environment, Elsevier.
- Etterlin, G. K., Hürsch, P. und Topf, M. (1992). Ökobilanzen: ein Leitfaden für die Praxis. B I Wissenschaftsverlag, Mannheim.
- FAT (1994). Maschinenkosten 1995 - Kostenelemente und Entschädigungsansätze für die Benützung von Landmaschinen. In: FAT - Berichte. 449 Eidg. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik (FAT), Tänikon. 32 S.
- FAW (1994). Pflanzenbehandlungsmittel - Verzeichnis 1994/95 (Nachtrag). Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, Bern. 200 S.
- Geissen - Broich, V. (1995). Einfluss der Abflamntechnik auf das Bodenlebewesen. Ökologie und Landbau 23(1): 31-32.
- Gerber, H. R., Ziegler, P. und Dubach, P. (1970). Leaching as a tool in the evaluation of herbicides. In: 10th Br. Weed Conference. 118-125 S.
- Golwer, A. und Schneider, W. (1983a). Untersuchungen über die Belastung des Grundwassers mit organischen Stoffen im Bereich von Strassen. In: Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik. 391 Bundesminister für Verkehr, Abteilung Strassenbau, Bonn-Bad Godesberg. 25-47 S.
- Golwer, A. und Schneider, W. (1983b). Untersuchungen über die Belastung des unterirdischen Wassers mit anorganischen toxischen Spurenstoffen im Gebiet von Strassen. In: Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik. 391 Bundesminister für Verkehr, Abteilung Strassenbau, Bonn-Bad Godesberg. 1-23 S.
- Görgens (1992), persönliche Mitteilungen.
- Gottlieb-Duttweiler-Institut (1992). Ökobilanzen - Grenzen und Möglichkeiten. Fachtagung Ökobilanzen, Rüschlikon / St. Gallen, Gottlieb Duttweiler Institut und Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt.
- Grossbard, E. und Atkinson, D., Eds. (1985). The herbicide glyphosate. Butterworths, London, Boston.
- Grosskopf, J. (1988). Die Aktivitätsstruktur der Carabiden (*Col.*) des Strassenrandes als Folge von Mulchen und Saugmäher. Natur und Landschaft 63(12): 511-516.
- Grottker, M. (1986). Runoff quality from a street with medium traffic loading. Highway pollution, London, The Science of the Total Environment, Elsevier.
- Gut, D., Potter, C. A. und Barben, E. (1993). Obstbau - Herbizide. Schweizerische Zeitschrift für Obst- und Weinbau 129: 206-214.
- Habersatter, K. und Widmer, F. (1991). Ökobilanz von Packstoffen. In: Schriftenreihe Umwelt. Nr. 132 Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 167 S.
- Hahn, H. H. und Xanthopoulos, C. (1990). Gewässerbelastung durch niederschlagsbedingte Einleitungen. Korrespondenz Abwasser 37(10): 1215-1222.

- Hamilton, R. S., Revitt, D. M., Warren, R. S. und Duggan, M. J. (1986). Metal mass balance studies within a small highway dominated catchment. Highway pollution, London, The Science of the Total Environment, Elsevier.
- Heidler, G. (1995). Sachverständigengutachten zur Genehmigung von Weihnachtsbaumkulturen (im Landschaftsschutzgebieten) unter Berücksichtigung von Herbizideinsätzen bzw. mechanischen oder kulturtechnischen Verfahren zur Unkrautbekämpfung und deren Folgewirkungen auf den Naturhaushalt. Bericht Heft 1. 5.8.1994. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Abteilung für Pflanzenschutzmittel und Anwendungstechnik.
- Heindl, B. (1990). Dominanzgesellschaften der innersten Strassenrandzone als Indikatoren für standörtliche Veränderungen. Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie, Osnabrück,
- Heindl, B. (1992). Untersuchungen zur ökologischen und geographischen Gliederung der Strassenbegleitvegetation innerhalb eines Nord-Süd-Transeks zwischen dem Nordwestdeutschen Tiefland und der mediterranen Küstenebene. Universität Würzburg, Lehrstuhl für Botanik II, Berlin.
- Hemmann, K., Hopp, I. und Paulus, H. F. (1987). Zum Einfluss der Mahd durch Messerbalken, Mulcher und Saugmäher auf Insekten am Strassenrand. Natur und Landschaft 62(3): 103-106.
- Hernandez Munoz, A. und Hontoria Garcia, E. J. (1986). Pollutant removal from highway surfaces in Madrid using irrigation techniques. Highway pollution, London, The Science of the Total Environment, Elsevier.
- Herrmann, R., Daub, J. und Striebel, T. (1992). Charakterisierung und Analyse der Verschmutzung des Niederschlages und des Niederschlagsabflusses. In: Niederschlagsbedingte Schmutzbelastung der Gewässer aus städtischen befestigten Flächen. Phase I Universität Bayreuth, Bayreuth. 206 S.
- Hofstetter, P. und Braunschweig, A. (1994). Bewertungsmethoden in Ökobilanzen - ein Überblick. GAIA 3(4): 227-236.
- Hofstetter, P., Jensen, A. A. und Schaltegger, S. (1994). Workshop on Impact Assessment, July 8th-9th, 1994, Zürich, SETAC-Europe, Bruxelles.
- Högger (1993), persönliche Mitteilungen.
- Imbeck, P. (1989). Der Strassenraum als Lebensraum. Strasse und Verkehr 75(4): 196-200.
- IPCS (1994). Glyphosate. Environmental Health Criteria 159. International Programme on Chemical Safety. WHO.
- Jager, D. T., Vermeire, T. G., Sloof, W. und Roelfzema, H. (1994). Uniform system for the evaluation of substances II - Effects assessment. National Institute of public health and environmental protection, 3720 BA Bilthoven, The Netherlands.
- Jolliet, O. (1993). Ökobilanz thermischer, mechanischer und chemischer Kartoffelkrautbeseitigung. Landwirtschaft Schweiz 6(11-12): 675-682.
- Jolliet, O. (1994). Critical surface-time: an evaluation method for life cycle assessment, from emission to concentration. In: Integrate Impact assessment in to LCA. SETAC-Europe congress, Brussel,
- Kern, U., Wüst, W., Daub, J., Striebel, T. und Herrmann, R. (1992). Abspülverhalten von Schwermetallen und organischen Mikroschadstoffen im Strassenabfluss. gwf 133(11): 567-574.
- Klapp, E. (1965). Grünlandvegetation und Standorte - nach Beispielen aus West-, Mittel- und Süddeutschland. Parey Verlag, Berlin.
- Klein, A. (1980). Die Vegetation an Nationalstrassenböschungen der Nordschweiz und ihre Eignung für den Naturschutz. Geobotanisches Institut der ETH, Zürich.
- Klein, A. (1984). Les herbicides dans l'entretien des routes. In: Les cahiers de l'environnement. 10 l'Office fédéral de la protection de l'environnement, Berne. 111 S.
- Klein, H. (1982). Die Beschaffenheit der Niederschlagsabflüsse von Autobahnen. Wasserwirtschaft 72(2): 37-43.

- Krause, A., Lohmeyer, W. und Trautmann, W. (1989). Rasenansaat und ihre Fortentwicklung an Autobahnen. In: Rasenansaat und ihre Fortentwicklung an Autobahnen. 20 Bundesforschungsanstalt für Naturschutz und Landschaftsökologie, Bonn-Bad Godesberg. 125 S.
- Kreeb, K. H. und Warnke, D. (1994). Infrarotstrahlen gegen Pflanzenbewuchs an Gleisanlagen. Eisenbahningenieur 45(3): 160-166.
- Krejci, V., Lange, J. und Schilling, W. (1992). Gewässerschutz bei Regenwetter. GAIA 1(2): 72-83.
- Landwirtschaftskammer Hannover (1993). Nichtchemische Wildkrautbeseitigung im öffentlichen Grün - Probleme und Perspektiven. Ergebnisbericht eines im Pflanzenschutzamt der Landwirtschaftskammer Hannover durchgeführten Seminars. Ed. Landwirtschaftskammer Hannover, Pflanzenschutzamt, Hannover.
- Leach, G. (1975). Energie and food production. IPC Science and technology - Press :
- Lord, B. N. (1986). Nonpoint source pollution from highway stormwater runoff. Highway pollution, London, The Science of the Total Environment, Elsevier.
- Maestri, B. und Byron, N. L. (1986). Guide for mitigation of highway stormwater runoff pollution. Highway pollution, London, The Science of the Total Environment, Elsevier.
- Marti, M. und Akos, I., Eds. (1992). Ökobilanzen in der Praxis. Schweizerische Mustermesse, Basel.
- Masé, G. und Klein, A. (1991). Herbizidfreier Strassen- und Grünanlagenunterhalt in den Gemeinden. In: Schriftenreihe Umwelt. Nr. 142 Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 183 S.
- Müller, C. (1993). Untersuchungen über das Freihalten der Bahnanlagen von störendem Pflanzenbewuchs. In: Schriftenreihe Umwelt. Nr. 189 Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 56 S.
- Müller, H. und Steinwarz, D. (1988). Auswirkungen unterschiedlicher Schnittvarianten auf die Arthropodenzönose einer urbanen Grünfläche. Natur und Landschaft 63(7/8): 335-339.
- Müller-Wenk, R. (1978). Die ökologische Buchhaltung - Ein Informations- und Steuerungsinstrument für umweltkonforme Unternehmenspolitik. Stiftung Gesellschaft und Unternehmen, Campus Verlag, Frankfurt.
- Ö.B.U., Ed. (1994). Methoden für Ökobilanzen und ihre Anwendung in der Firma. 5 international bekannte Ökobilanz-Methoden im Vergleich. Schweizerische Vereinigung für ökologisch bewusste Unternehmensführung (Ö.B.U.), Adliswil.
- Oberwalder, C. (1992). Über das Vorkommen von Pflanzenschutzmitteln im Niederschlagswasser und deren ökologische Bedeutung. Dissertation Universität Hohenheim.
- Pawlizki, K.-H. (1990). Ursachen der Grundwasserbelastung durch Herbizide und Möglichkeiten der Verminderung. Erwerbsobstbau 32(3): 69-75.
- Perkow, W. (1992). Wirksubstanzen der Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmitteln. Verlag Paul Parey.
- Pimentel, D. (1980). Handbook of energy utilization in agriculture. CRC Press Inc, Boca Raton, Florida.
- Rahmann und Hollnaicher (1989). Auswirkungen der Beikrautregulierung durch ein Infrarotstrahlgerät auf die Tierwelt im Boden dreier Standorte am Killesberg/Stuttgart. Untersuchungsbericht Universität Stuttgart-Hohenheim.
- Rannertshauser, J. (1990). Thermische Unkrautbekämpfung. KTBL Arbeitsblatt LFd. Nr. 0665. 1990. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt.
- Reupert, R. und Plöger, E. (1989). Bestimmung stickstoffhaltiger Pflanzenbehandlungsmittel in Trink-, Grund- und Oberflächenwasser: Analytik und Ergebnisse. Vom Wasser 72: 211-233.
- Rick, B. (1993). Atrazin im Grundwasser - eine Modellstudie. gwa 73(6): 438-446.

- Roth-Kleyer, S. (1995). Alternativen zum Pestizideinsatz - Einsatz kombinierter Infrarot - Abflammgeräte. *Der Gartenbau* 1995(11): 8-10.
- Schaffner, M. (1995), persönliche Mitteilungen.
- Schaltegger, S. (1994). Koordiniertes Ökobilanzieren im KOPÖ. *GAIA* 3(4): 187.
- Schaltegger, S. und Sturm, A. (1992). Ökologieorientierte Entscheidungen in Unternehmen. Paul Haupt Verlag, Bern.
- Schmidt, W. und Stottele, T. (1988). Flora und Vegetation an Strassen und Autobahnen der Bundesrepublik Deutschland. In: *Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*. 529 Bundesminister für Verkehr, Abteilung Strassenbau, Bonn-Bad Godesberg. 191 S.
- Shahbazi, A. und Goswami, D. Y. (1986). On-farm and off-farm energy use. In: *Alternative energy in agriculture*. 1 CRC Press, Boca Raton, Florida. S.
- Sieker, F. und Grottker, M. (1987). Beschaffenheit von Strassenoberflächenwasser bei mittlerer Verkehrsbelastung. In: *Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*. 530 Bundesminister für Verkehr, Abteilung Strassenbau, Bonn-Bad Godesberg. 158 S.
- Smith, M. E. und Kaster, J. L. (1983). Effect of rural highway runoff on stream benthic macroinvertebrates. *Environmental Pollution* 32(Series A): 157-170.
- Solvay-Duphar B.V. (1995). NL-1243 ZG 's-Graveland , persönliche Mitteilung.
- Sturm, A. (1993). Oeko - Controlling: Von der Ökobilanz zum Führungsinstrument. *GAIA* 2(2): 107-120.
- SUVA (1989). Verwendung von Flüssiggas auf Fahrzeugen. In: *Flüssiggasrichtlinien*. Teil 3, Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA), Luzern. Ausgabe 1979, 36 S.
- SUVA (1994). Verwendung von Flüssiggas in Haushalt, Gewerbe und Industrie. In: *Flüssiggasrichtlinien*. Teil 2, Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA), Luzern. Ausgabe 1977, 76 S.
- Svensson, S.-E. (1991). Borstning och harvning. Effektiva alternativ för ogräskontroll på hårdgjorda ytor. In: *Gröna Fakta*. D5 Lantbruksuniversitet, Alnarp. 8 S.
- Theiler (1994), persönliche Mitteilungen.
- UBA (1992). Ökobilanzen für Produkte. Texte 38/92. Juli 1992. Umweltbundesamt, Berlin.
- Ullmann, I. und Heindl, B. (1989). Geographical and ecological differentiation of roadside vegetation in temperate europe. *Botanica Acta* 102: 261-269.
- Ullmann, I., Heindl, B., Fleckenstein, M. und Mengling, I. (1988). Die strassenbegleitende Vegetation des mainfränkischen Wärmegebietes. Sonderdruck aus *Berichte der Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)* 12: 141-187.
- Ullmann, I., Heindl, B. und Schug, B. (1990). Naturräumliche Gliederung der Vegetation auf Strassenbegleitflächen im westlichen Unterfranken. *Tuexenia* 10: 197-222.
- Warren, R. S. und Birch, P. (1986). Heavy metal levels in atmospheric particulates, roadside dust and soil along a major urban highway. *Highway pollution*, London, The Science of the Total Environment, Elsevier.
- Wasner, U. (1984). Schonende Strassenrandpflege lässt Kleintierfauna überleben. *Mitteilungen der Löff* 9(2): 9-16.
- Wasner, U. (1987). Wirkungen der Saugmahd auf den Insektenbestand am Strassenrand. *Löff-Berichte* :
- Wauchope, R. D., Buttler, T. M., Hornsby, A. G., Augustijn-Beckers, P. W. M. und Burt, J. P. (1992). The SCS/ARS/CES pesticide properties database for environmental decision-making. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 123: 1-23.
- Weber, A. (1993), persönliche Mitteilungen.

- Wegelin, T. (1984). Schaffung artenreicher Magerwiesen auf Strassenböschungen. Geobotanisches Institut der ETH, Zürich.
- Wolff-Straub, R. und Wasner, U. (1981). Langzeituntersuchungen an Saumbiotopen. Mitteilungen der Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung 6(3): 89-90.
- Xanthopoulos, C. und Hahn, H. H. (1992). Schadstoffe im Regenabfluss in städtischen Gebieten. Korrespondenz Abwasser 39(9): 1282-1304.
- Yousef, Y. A., Hvitved-Jacobsen, T., Wanielista, M. P. und Harper, H. H. (1986). Removal of contaminants in highway runoff flowing through swales. Highway pollution, London, The Science of the Total Environment, Elsevier.
- Yousef, Y. A. und Yu, L. L. (1992). Potential contamination of groundwater from Cu, Pb, and Zn in wet detention ponds receiving highway runoff. J. Environ. Sci. Health A27(4): 1033-1044.
- Zaugg, W. (1995), persönliche Mitteilungen.
- Zior, F. (1987). Regenwasserabfluss auf Fahrbahnoberflächen - experimentelle und theoretische Untersuchungen. In: Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik. 38 Institut für Wasserbau, Technische Hochschule, Darmstadt. 1-51 S.

ANHANG

- A. Pflanzenliste**
- B. Arbeits-, Material- und Energieaufwand der verschiedenen Geräte und Fahrzeuge, inkl. Kostenberechnungen der Verfahren**
- C. Mobilität von Glyphosate in Glaskolonnen mit Kiessand**

Anhang A

Übersichtstabelle A-1: Veränderung der Artenzusammensetzung nach chemischen, thermischen und mechanischen Behandlungen in Knonau, Bad Ragaz und Wädenswil. Die unbehandelten Kontrollparzellen blieben im Artenspektrum ungefähr konstant. Bestandesaufnahmen nach Klapp (1965), umgerechnet in Deckungsgrade nach Braun-Blanquet (1964).

		Knonau			Bad Ragaz					Wädenswil				
		1992	1994		1992	1994				1992	1994			
		Kont.	Bl.H.	Bo.H.	Kont.	Bl.H.	Bo.H.	therm	mech	Kont.	Bl.H.	Bo.H.	therm	mech
Gräser	Monokotyledonen													
Fromental/Glatthafer	Arrhenatherum	+			1			+	+	2			1	+
Fuchsschwanz, Acker-	Alopecurus myosuroides				1			+	+					
Fuchsschwanz, Wiesen-	Alopecurus pratensis				1			+	+					
Goldhafer	Trisetum flavescens	+												
Honiggras, Weiches	Holcus mollis	+												
Honiggras, Wolliges	Holcus lanatus	+												
Knaulgras	Dactylis glomerata				2	+	+	1	1	1	+	+	+	+
Quecke, Gemeine	Agropyron repens	+			2	+	+	1	1	1	+	+	1	1
Raigras, Englisches	Lolium perenne				2			+	+	1			+	+
Raigras, Italienisches	Lolium multiflorum				1			+	+	1			+	+
Rispengras, Einjähriges	Poa annua	+			1	+		+	+	1				+
Rispengras, Gemeines	Poa trivialis				1	+		+	+					
Rispengras, Wiesen-	Poa pratensis				2	+		+	+	2			+	+
Ruchgras, Wiesen-	Anthoxanthum odoratum	+												
Schilf, Gemeines	Phragmites communis	+	+	+										
Schwingel, Rohr-	Festuca arundinacea	1	+	+	1	+		1	1					
Schwingel, Rot	Festuca rubra	2	+	+	2	+		1	+	2	+		1	+
Schwingel, Schaf-	Festuca ovina	1	+	+										
Schwingel, Wiesen-	Festuca pratensis	1			2	+		2	2					
Straussgras, Ausläufer-	Agrostis stolonifera				1	+	1	2	2	2	+	+	2	1
Straussgras, Gemeines	Agrostis tenuis				1	+	1	+	+					
Timotheusgras	Phleum pratense				2			+	+	2			+	+
Trespe, Aufrechte	Bromus erectus	3	+	+	2			+	+	2			+	+
Trespe, Taube	Bromus sterilis	+												
Trespe, Wehrlose	Bromus inermis	3	+	+	1			2	1	1			1	1
Trespe, Weiche	Bromus mollis	+												
Borstenhirse, Grosse	Setaria faberii	+	1	+										
Borstenhirse, Grüne	Setaria viridis	1	3	1	+	+	+		+	+	+	+		+
Fingerhirse, Blut-	Digitaria sanguinalis	+	1	+	+	+	+		+	+				+
Hirse	Panicum ssp.	+	1	1										
Hühnerhirse	Echinochloa crus-galli	+	1	+										
Kräuter	Dikotyledonen													
Amarant	Amaranthus ssp.				+	1	+		+					
Bärenklau, Wiesen-	Heracleum sphondylium				1	1	+		+	+	+	+	+	+
Baumtropfen, Geissfuss	Aegopodium podagraria				1	+	+	+	+	+	+	+	1	1
Berufskraut, Kanadisches	Erigeron canadensis	+	1	1	+	1	+		+	1	+	+	+	+
Brennessel	Urtica dioeca	+		+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
Ehrenpreis	Veronica ssp.	+	+	+	1	1	+		+	+	+	+	+	+
Erdbeere	Fragaria ssp.				+	+	+	+	+	1	+	+	1	1
Fingerkraut, Aufrechtes	Potentilla erecta	+	1	1										
Fingerkraut, Gänse-	Potentilla anserina	+	+	+										
Fingerkraut, Kriechendes	Potentilla reptans	+	2	2	1	2	2	+	1	+	1	1	1	1
Flockenblume	Centaurea ssp.	+	+	+										
Franzosenkraut	Galinsoga ssp.	+	1	1	1	1	+	+	+					
Frauenmantel	Alchemilla ssp.									+	+	+	+	+
Gänseblümchen	Bellis prennis				+	+	+		+					
Gänsedistel, Acker-	Sonchus arvensis		1	1	+	2	1		+	+	+	+		+
Gänsedistel, Kohl-	Sonchus oleraceus		1	1	+	2	1		+	+	1	1		+
Gänsedistel, Rauhe	Sonchus asper		1	1	+	+	+		+		1	1		+
Gänsefuss, Weisses	Chenopodium album					1	1		+		1	+		+
Gauchheil, Acker-	Anagallis arvensis	+	+	+										
Goldrute, Kanadische	Solidago canadensis	+	1	1										
Gundelrebe	Glechoma hederaceum	+	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	+	1
Günsel, Kriechender	Ajuga reptans	+	+	+										
Habichtskraut	Hieracium ssp.	+	1	1						+	1	1	+	+
Hahnenfuss, Acker-	Ranunculus arvensis									+				+
Hahnenfuss, Scharfer	Ranunculus acer				1	+	+	+	+	+				+
Hirtentäschelkraut	Capsella bursa-pastoris	+	+		1	1	+	+	+	+			+	+
Hornkraut, Acker-	Cerastium arvense	+	1	1	+	1	+	+	+	1	+	+	+	+
Huflattich	Tussilago farfara									1	1	+	1	+
Johanniskraut	Hypericum ssp.	+	+	+										
Kamille	Matricaria ssp.				1	2	+	+	+					
Kerbel	Chaerophyllum ssp.				+	+	+	+	+					
Klappertopf	Rhinanthus ssp.	1												
Knöterich	Polygonum ssp.				1	1	+	1	1	+	+	+	+	+
Königskerze	Verbascum ssp.				+	1	+	+	+	+	+	+	+	+
Korbblütler (div. Keimlinge)	Compositae ssp.	+	+	+	1	1	+	+	+	+	+	+	+	+
Kratzdistel, Acker-	Cirsium arvense	+	+	+	1	1	1	+	+	+	+	+	+	+

		Knouau			Bad Ragaz					Wädenswil				
		1992	1994		1992	1994				1992	1994			
		Kont.	Bl.H.	Bo.H.	Kont.	Bl.H.	Bo.H.	therm	mech	Kont.	Bl.H.	Bo.H.	therm	mech
Kräuter		Dikotyledonen												
Kreuzkraut	Senecio ssp.	+	+	+	+	1	1		+	+	1	+		
Labkraut, Kletten-	Galium aparine	+	1	+	+	+	+			+	+	+		
Leimkraut, Nelke	Silene ssp.				+	+	+			+		+		
Löwenzahn	Taraxacum officinale	1		1	2	1	1	+	1	1	+	+	1	1
Malve	Malva ssp.	+		+										
Margrite	Chrysanthemum ssp.				1	1	+	+	+	1	+	+	+	+
Mauerpfeffer, Behaarter	Sedum hirsutum									1	1	1	1	1
Mauerpfeffer, Scharfer	Sedum acer									2	2	2	2	2
Mauerpfeffer, Weisser	Sedum album									+	+	+	+	+
Melde	Artiplex ssp.				+	+	+			+	+	+	+	+
Möhre, Gewöhnliche	Daucus carota	+	1	1	1	2	1	+	+	+	1	1	+	1
Natternkopf	Echium vulgare	+												
Pippau	Crepis ssp.	+	+	+	+	+	+			+	+	+	+	+
Schafgarbe, Gewöhnliche	Achillea millefolium	+	1	+	1	2	1	+	+	1	1	1	1	1
Schaumkraut, Behaartes	Cardamine hirsuta	+			+	+	+							
Senf	Brassica ssp.				1	1	+		+					
Skabiose	Scabiosa ssp.	+	+	+										
Storchenschnabel	Geranium ssp.									1	+	+	+	+
Vogel-/Stermiere	Stellaria media	+	1	+	1	1	+	+	+	1	1	+	+	+
Wegerich, Grosser	Plantago major				+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Wegerich, Mittlerer	Plantago media	+	+	+	1	+	+	+	+	+		+	+	+
Wegerich, Spitzer	Plantago lanceolata				1	+	+	+	+	1	+	+	1	+
Wegwarte, Gewöhnliche	Cichorium intybus	+	+		+	+			+					
Weidenröschen	Epilobium ssp.	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+		
Wiesenknopf, Kleiner	Sanguisorba minor	1	+	1										
Winde, Acker-	Convolvulus arvensis				1	+	1	+	111	+	+	1	+	1
Wittwenblume	Knautia ssp.	+	+											
Wolfsmilch	Euphorbia ssp.	+			+	+	+			1	1	1	+	1
Klee		Leguminosen												
Honigklee, Weisser	Melilotus alba Medicus	+	+	+										
Hopfenklee	Medicago lupulina	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
Steinklee, Echter	Melilotus officinalis	+	1	1										
Weisser Klee	Trifolium repens				1	1	1	+	+	1	1	+	1	1
Wiesen-Klee/Rotklee	Trifolium pratense				+	+	+	+	+	1	+	+	+	+
Wundklee, Gewöhnlicher	Anthyllis vulgaris	+												
Seggen		Carex												
Seggen	Carex ssp.	+	1	1						+	+	+	+	+
Schachtelhalme		Equisetum												
Schachtelhalm, Acker-	Equisetum arvense	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Schachtelhalm, Sumpf-	Equisetum palustre									+	+	+	+	1
Holzpflanzen														
Brombeere	Rubus ssp.	+	1	1										
Esche, Gewöhnliche	Fraxinus excelsior	1	1	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Hasel	Corylus	+	+	+										
Himbeere	Rubus idaeus	1	1	1	+	+	+	+	+					
Schneeball	Viburnum	+	+	+										
Waldröbe	Clematis ssp.	1	1	1	+	+	+	+	+					

Legende: Genaue Beschreibung der Verfahren und Behandlungen vergleiche Teil 2 Methodik.

Kont. = unbehandelte Kontrollparzellen

Bl.H. = Blattherbizideinsatz

Bo.H. = Bodenherbizideinsatz

therm = Thermische Verfahren

mech = Mechanische Verfahren

Bestandesaufnahmen / Artmächtigkeit nach Braun-Blanquet (1964):

Artemächtigkeit	Deckungsgrad (Dominanz)	Individuenzahl (Abundanz)
5	> 75 % der Fläche deckend	beliebig
4	50 - 75 % der Fläche deckend	beliebig
3	25 - 50 % der Fläche deckend	beliebig
2	5 - 25 % der Fläche deckend	falls Deckungsgrad < 5 % aber sehr zahlreiche Individuen
1	< 5 % der Fläche deckend	falls Deckungsgrad > 5 % aber nur wenige Individuen
+	geringe Fläche deckend	spärlich

Anhang B: Arbeits- und Energieaufwand der Teststrecken, klimatische und verfahrensspezifische Bedingungen

Tabelle B-1: Infrarotgerät: Arbeitszeit- und Energieaufwand, um 500 m Teststrecke an der Nationalstrasse N3 zu behandeln. Arbeitsbreite ca. 0.8 m. Erhobene Rohdaten und Rahmenbedingungen bei den Behandlungen. Verfahren vgl. Teil 2 "Methodik".

Datum	Propangas- verbrauch [kg/h]	Geschwindig- keit [km/h]	Tempe- ratur [° C]	rel. Luft- feuchtigkeit [%]	Arbeits- druck [bar]	Feuer- gefahr	Spezielles
08.07.92	28.8	2.4	17	78	1,5	Nein	
05.08.92	19.9	3.0	24	73	1,5	Nein	
25.08.92	21.0	2.2	26	67	1,5	Ja	
21.10.92	21.5	0.6	7	85	1	Nein	leichter Regen
05.05.93	18.5	1.3	12	79	1-1,5	Nein	
25.05.93	19.2	1.3	25	60	1,5	Ja	
23.06.93	28.9	1.7	19	90	1,5	Ja	
11.08.93	21.6	1.6	21	71	1,5	Nein	
04.11.93	13.5	0.9	6	97	<1	Nein	Nebel
Mittelwert	21.4	1.7	17	78			
Standardfehler	1.6	0.3	3	4			

Tabelle B-2: Abflammgerät: Arbeitszeit- und Energieaufwand, um 500 m Teststrecke an der Nationalstrasse N3 zu behandeln. Arbeitsbreite ca. 0.4 m. Erhobene Rohdaten und Rahmenbedingungen bei den Behandlungen. Verfahren vgl. Teil 2 "Methodik".

Datum	Propangas- verbrauch [kg/h]	Geschwindig- keit [km/h]	Tempe- ratur [° C]	rel. Luft- feuchtigkeit [%]	Arbeits- druck [bar]	Feuer- gefahr	Spezielles
22.6.92	19.4	2.6	19	71	2	Nein	
15.7.92	12.6	2.9	24	68	2	Ja	
29.7.92	12.0	2.6	23	65	2	Ja	
4.11.92	12.0	1.1	9	96	2	Nein	leichter Regen
6.5.93	12.7	1.2	11	84	2	Nein	
26.5.93	12.7	1.7	28	55	2	Ja	
22.6.93	12.7	1.7	22	85	2	Ja	
18.8.93	8.7	1.4	20	84	2	Nein	Nur 2 Brennerstufen
7.9.93	8.5	1.8	15	85	2	Nein	leichter Regen, Nur 2 Brennerstufen
7.11.93	9.2	1.1	9	94	2	Nein	Nebel, Nur 2 Brennerstufen
25.4.94	11.1	1.3	14	80	2	Nein	
9.8.94	10.0	1.5	24	79	2	Ja	
6.9.94	11.3	1.4	22	76	2	Nein	
Mittelwert	12.7	1.7	19	79			
Standardfehler	0.6	0.1	1	3			

Tabelle B-3: Flachstahlbesen: Arbeitszeit- und Materialaufwand, um 500 m Teststrecke an der Nationalstrasse N3 zu behandeln. Arbeitsbreite 1 - 3 cm. Erhobene Rohdaten und Rahmenbedingungen bei den Behandlungen. Behandlungen immer vormittags. Gerät: Wildkrautbesen mit 60 Flachstahlbüscheln, Ø 23 mm (Tellerbesen Ø ≈ 500 mm), angebaut an Strassenkehrmaschine MFH 4200. Verfahren vgl. Teil 2 "Methodik".

Datum	Geschwindigkeit [km/h]	Wasser- verbrauch [l/km]	Tempe- ratur [° C]	rel. Luft- feuchtigkeit [%]	Spezielles
28.4.92	0.95	70	14	81	Boden trocken
31.7.92	0.83	400	27	64	8 Tage kein Regen
20.10.92	1.38	0	6	93	feucht, Regen
26.4.93	1.22	100	17	55	Boden trocken
16.8.93	0.69	140	23	74	5 Tage kein Regen
3.11.93	1.26	100	6	96	10 Tage kein Regen
18.4.94	1.24	0	5	85	Boden nass
22.8.94	0.90	0	21	71	Boden nass
Mittelwert	1.06	101	15	77	
Standardfehler	0.09	47	3.0	5.0	

Tabelle B-4: Seilbesen: Arbeitszeit- und Materialaufwand, um 500 m Teststrecke an den Nationalstrassen N3 und N13 zu behandeln. Arbeitsbreite 10 - 15 cm. Erhobene Rohdaten und Rahmenbedingungen bei den Behandlungen. Gerät: Wildkrautbesen mit Drahtseilstruppen der Firma Wicki und Schacher in Wädenswil (W) mit Besendurchmesser 500 mm, 50 Seilstruppen Ø 23 mm, Trägerfahrzeug Pony in Bad Ragaz (BR) mit Besendurchmesser 700 mm, 80 Seilstruppen Ø 21 mm, Trägerfahrzeug MFH 4000. Verfahren vgl. Teil 2 "Methodik".

Datum	Geschwindigkeit [km/h]	Humusabtrag [m³/km]	Wasser- verbrauch [l/km]	Temperatur [° C]	rel. Luft- feuchtigkeit [%]	Spezielles
W - 12.6.1992	0.51	2.0		13	82	abranden
W - 12.6.1992	0.79	-		13	82	Rinne
W - 10.5.1993	0.78	1.5		16	61	Rinne + Rand
W - 28.4.1994	0.72	1.0		14	66	Rinne + Rand
BR - 10.6.1992	0.60	1.1	375	15	50	abranden
BR - 17.11.1992	0.75	2.3	0	4	52	abranden
BR - 27.4.1993	0.80	1.8	100	20	34	abranden
BR - 27.4.1994	0.70	1.5	0	12	48	abranden
Mittelwert	0.71	1.6	119	W:14; BR:13	W:73; BR:46	
Standardfehler	0.05	0.2	89	W:0.7; BR:3.3	W:5.4; BR:4.1	

Tabelle B-5: Verwendete Grunddaten der Fahrzeuge zur Berechnung des Material- und Energieaufwandes der Methoden. Beschreibung der Verfahren vgl. Teil 2 "Material und Methoden".

		UNIMOG U-90	UNIMOG U-2100 (Lastwagen)	MFH MFH-4000	Pony DP602-3	Strassenkehr- maschine (RAVO 4000,SE)
Maschinengewicht ¹	kg	3500	6000	4000	2000	4300
Abschreibungsdauer ²	Jahre	10	10	10	10	10
Auslastung / Jahr ³	h	1000	800	1000	800	1000
Tot.Betriebsstd./Lebensdauer ⁴	h	10000	8000	10000	8000	10000
Leistung Motor	kW	67	157	74	48	60
	PS	90	214	100	65	82
Dieserverbrauch ⁵	l/h	6	10	6	6	6
	g/kWh	260	230	ca. 230	ca. 260	ca. 230
kg Maschine pro h ⁶	kg/h	0.350	0.750	0.400	0.250	0.430

¹ Technische Angaben der Firmen

² Mutmassliche Nutzungsdauer (Abschreibungsdauer) nach Zeit, mitberücksichtigt wurde die technische Veralterung und die Abnützung der Fahrzeuge (Firmenangaben)

³ Durchschnittliche jährliche Einsatzstunden, Firmenangaben

⁴ Abschreibungsdauer multipliziert mit der jährlichen Auslastung

⁵ Durchschnittliche Schätzwerte gemäss Firmen: Mitberücksichtigt wurde die durchschnittliche Motorenbelastung während der Arbeitsphase

⁶ Materialabschreibung pro Betriebsstunde; Maschinengewicht dividiert durch die totale Anzahl Betriebsstunden

Tabelle B-6: Verwendete Grunddaten der Anbaugeräte zur Berechnung des Material- und Energieverbrauches. Beschreibung der Verfahren vgl. Teil 2 "Material und Methoden".

		Infrarot- gerät	Abflam- gerät Schaffner	Seilbesen HWH Wicki	Pflug & Aufnahme Zaugg	Flach- stahl MFH	Spritze ⁷ , flüs- sige Blatt- und Bodenh.	Streuer ⁸ granu- lierte H.
Maschinengewicht (ohne Verschleisssteile)	kg	400 ⁹	250 ¹⁰	275 ¹¹	1500	125 ¹²	300	300
Abschreibungsdauer ¹³	Jahre	10	10	10	10	10	12	10
Auslastung / Jahr ¹⁴	h	500	500	500	200	200	58	90
Tot.Betriebsstunden / Lebensdauer ¹⁵	h	5000	5000	5000	2000	2000	700	900
kg Maschine ¹⁶ pro h	kg/h	0.080	0.050	0.055	0.75	0.063	0.429	0.333
Fahrtgeschwindigkeit ¹⁷	km/h	3	3	0.7	0.8	1	4	4
Bürsten- oder Pflug- gewicht	kg			75 ¹⁸	12 ¹⁹	13.5 ²⁰		
Nutzungsdauer der Bürste ²¹	h			50	100	50		
Bürsten- Pflugverbrauch ²²	kg/h			1.500	0.120	0.270		
Totale kg Maschine ²³ pro h	kg/h	0.080	0.050	1.555	0.870	0.333	0.429	0.333
Propangasverbrauch ²⁴	kg/h	21.4	12.7					
Herbizide (pro Applikation) ²⁵	kg a.i./ km						0.089 ²⁶ 0.025 ²⁷ 0.173 ²⁸	0.113 ²⁹
Durchgänge pro Jahr ³⁰		3-5 (4)	3-5 (4)	alle 2-3 J. (0.33)	alle 3-4 J. (0.25)	2-4 (3)	Glu 1-3 (3) Gly 1-2 (2) Oryz 1 (+ 1 Gly 1) (2)	Dichlo 1-2 (1)

- 7 Analog einer landwirtschaftlichen Anbauspritze, 500 l Fass, alle Daten hierzu aus FAT (1994)
- 8 Analog einem landwirtschaftlichen Schleuderstreuer, bis 450 l, alle Daten hierzu aus FAT (1994)
- 9 Prototyp inkl. Anbaurahmen (unsere Anbauversion war noch schwerer)
- 10 Firmenangabe zum Gerät STf - RG 3 (komplett mit Anbaurahmen)
- 11 Firmenangabe zum Gerät RH - 2 S Gerätearm (ohne Tellerbesen)
- 12 Firmenangabe, Anbauvorrichtung an Strassenkehrmaschine MFH 4200 (ohne Tellerbesen)
- 13 Mutmassliche Nutzungsdauer (Abschreibungsdauer) nach Zeit, mitberücksichtigt wurde die technische Veralterung und die Abnutzung (Firmenangaben)
- 14 Beanspruchung der Maschine pro Jahr mit einer guten Auslastung. In Kalkulationen eines einzelnen Unterhaltsdienstes müssten die effektiven jährlichen Betriebsstunden verwendet werden
- 15 Abschreibungsdauer mal zugrunde gelegte jährliche Auslastung
- 16 Materialabschreibung pro Betriebsstunde; Maschinengewicht dividiert durch die totale Anzahl Betriebsstunden
- 17 z.T. optimistisch gerundete Arbeitsgeschwindigkeiten (vgl. auch Versuchsergebnisse)
- 18 gemäss Wicki AG, Retschwil
- 19 gemäss Gebr. Zaugg, Eggiwil
- 20 gemäss A+B Bürstentechnik: 60 Struppen à 225 g = 13.5 kg
- 21 Firmenangaben (50 - 150 h) und Svensson (1991)
- 22 Verschleisssteilgewicht dividiert durch die durchschnittliche Nutzungsdauer
- 23 Materialabschreibung pro Betriebsstunde; Summe von kg Maschine pro Stunde und Bürsten- und Pflugverbrauch (Bürstenverschleiss, Herstellung der Maschine, etc.)
- 24 Durchschnittswerte, ermittelt auf den 500 m langen Teststrecken
- 25 Aufwandmenge je nach Produkt multipliziert mit der behandelten Fläche pro Kilometer (A = 1000 m * 0.25 m = 250 m²)
- 26 Glyphosate dry (42 %): 8.5 kg/ha = 3570 g a.i./ha
- 27 Glufosinat (18 %; 200 g/l): 5 l/ha = 1000 g a.i./ha
- 28 1 Behandlung mit Oryzalin (48 %; 480 g/l): 7 l/ha = 3360 g a.i./ha und 1 Behandlung mit Glyphosate
- 29 Dichlobenil (7.5 %); 60 kg/ha = 4500 g a.i./ha
- 30 Versuchsergebnisse: Die angegebene Anzahl Behandlungen pro Jahr ergeben eine annähernd vergleichbare Wirkung auf dem Bankett. Für die weiteren Berechnungen wurden die Werte in den Klammern verwendet

Tabelle B-7: Beschreibung der verwendeten Kostenelemente zu Berechnung der jährlichen Aufwendungen einer Methode, analog FAT (1994). Beschreibung der Verfahren vgl. Teil 2 "Material und Methoden". Weitere Erläuterungen in Teil 3 "Technische und wirtschaftliche Aspekte".

Grundkosten		
* Abschreibungsdauer	[J]	Mutmassliche Lebensdauer (Abschreibung) in Jahren, mitberücksichtigt wurde die Abnützung und die technische Veralterung der Geräte.
* Raumbedarf	[m ³]	benötigte m ³ zu Unterbringung der Geräte
* Anschaffungspreis	[Fr.]	Neupreis in Franken ohne Anbau
1. Abschreibung	[Fr./J]	Preis / Abschreibungsdauer
2. Kapitalzins	[Fr./J]	Zinsfuss von 6% mal 0.6 (=60% des Kapitals gebunden) mal Anschaffungspreis
3. Versicherungen & Gebühren	[Fr./J]	2 ‰ des Anschaffungspreises
4. Gebäudekosten	[Fr./J]	Fr. 20.- pro m ³ Gebäudebedarf und Jahr für feuersichere Unterstände
Gebrauchskosten		
* Ø Bearbeitungsgeschwindigkeit	[km/h]	Verfahrensabhängige Geschwindigkeit, gerundetes Mittel aus den Versuchsergebnissen
* Ø Anzahl Behandlungen pro Jahr	[Anz./J]	Gerundetes Mittel aus den Versuchsergebnissen
* Unterhaltsstrecke pro Werkhof	[km]	75 km mal 2 Strassenseiten, ohne Mittelstreifen
* eff. beh. Strecke pro Jahr [km]	[J]	Anzahl Behandlungen pro Jahr mal Unterhaltsstrecke
* effektive jährliche Auslastung	[h]	Jährliche Beanspruchung der Maschine pro Werkhof, aus effektiv behandelter Strecke dividiert durch Arbeitsgeschwindigkeit
* Gasverbrauch	[kg Gas/h]	Versuchsergebnisse
* Besenabrieb, Verschleiss Pflug	[h/Besen]	Abnützung des Besens (Firmen- und Literaturangaben)
* Herbizidverbrauch	[kg a.i. Herbizid/ha]	Versuchsergebnisse
* Kosten pro Verbrauchs - Einheit	[Fr.]	Firmenangaben
1. Reparatur & Wartung	[Fr./J]	Ø 10% des Anschaffungspreis mal gerätespezifischer Reparaturfaktor
2. Energie- und Verschleisssteilkosten	[Fr./J]	Jährliche Energieverbrauchskosten resp. Kosten für Materialverschleiss
3. Spezielles	[Fr./J]	Deponiegebühren, etc.
Gesamtkosten für Gerät		
Gesamtkosten der Methode (Gerät, Fahrzeuge, Arbeiter inkl. allfälliger Signalisation)		

Tabelle B-8:

Kostenberechnung der chemischen, thermischen und mechanischen Methoden anhand eines Modellwerkhofes mit jährlich 300 km zu behandelnden Strassenbanketten. Um einen objektiven Vergleich zu erhalten, wurden Berechnungen und Entschädigungsansätze bei allen Methoden gleich gewählt, in der Praxis könnten dadurch Abweichungen entstehen. Beschreibung der Verfahren vgl. Teil 2 und Berechnungen Tabelle 15b.

Einheit	chemisch		thermisch		mechanisch		Flachstahl-		Kehr-		Unimog	
	Motor- spritze	Rücken- spritze	Infra- rot	Abflammen	Selb- besen	Abbrand & Aufnahme	Leitplanken- mähwerk	besen	maschine	U-2100	Unimog	U-90
Grundkosten												
total pro Jahr	1371	129	1580	2493	3060	13684	5140	1749	28900	34282	20803	
pro km und Jahr	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]
pro km (1 Behandlung)	5	0.4	6	8	10	46	17	6				
pro km (1 Behandlung)	2	0.2	1	2	31	182	6	2				
pro Einsatzstunde	9	0.9	4	6	21	146	29	2	29	34	21	
Abschreibungs- dauer	12	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Raumbedarf	20	3	15	15	15	77	50	15	65	65	50	50
Anschaffungspreis (ohne Montage)	8000	500	10000	15890	20000	88000	30000	10500	200000	239000	143500	143500
Abschreibung	667	50	1000	1589	2000	8800	3000	1050	20000	23900	14350	14350
Kapitalzins	288	18	360	572	720	3168	1080	378	7200	8604	5166	5166
Versicherungen & Gebühren	16	1	20	32	40	176	60	21	400	478	287	287
Gebäudekosten	400	60	300	300	300	1340	1000	300	1300	1300	1000	1000
Gebrauchskosten												
total pro Jahr	6080	5785	11272	7685	4512	5468	11250	7836	19200	26340	15810	15810
pro km und Jahr	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]
pro km (1 Behandlung)	20	19	38	26	15	18	38	26				
pro km (1 Behandlung)	10	10	9	6	45	73	13	9				
pro Einsatzstunde	41	39	28	19	32	58	63	9	19	26	16	16
Ø Bearbeitungs- geschwindigkeit	4	4	3	3	0.7	0.8	5	1				
Ø Anzahl Behandlungen pro Jahr	2	2	4	4	0.33	0.25	3	3				
Unterhaltsstrecke pro Werkhof	300	300	300	300	300	300	300	300				
effektiv behandelte Strecke	600	1200	1200	1200	100	75	900	900	0	0	0	0
Jährliche Auslastung	150	150	400	400	143	94	900	900	1000	1000	1000	1000
Gasverbrauch	[kg Gas/h]		21.4	12.7					6.00	10.00	6.00	6.00
Besenantrieb, Verschleiss Pflug	[h/Besen]				50	100	200	50				
Herbizidverbrauch	[kg Mittel/ha]	8.00										
Kosten pro Verbrauchs-Einheit	[Fr]	30	1.2	1.2	880	200	500	377	1.20	1.20	1.20	1.20
Reparatur & Wartung	[Fr/J]	320	25	1589	2000	5280	3000	1050	12000	14340	8610	8610
Energie- u. Verschleisskosten	[Fr/J]	5760	5760	6096	2512	188	450	6786	7200	12000	7200	7200
Spezielles: Entsorgung	[Fr/J]						7800					
Gesamtkosten für Gerät (Effektive Auslastung auf einem Werkhof mit 150 km mal 2 Strassenseiten)												
total pro Jahr	7451	5914	12952	10178	7572	19152	16390	9585	48100	60622	36613	36613
pro km und Jahr	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]
pro km (1 Behandlung)	25	20	43	34	25	64	55	32				
pro Einsatzstunde	12	10	11	8	76	255	18	11	11	11		
pro m2 (1 Behandlung)	50	39	32	25	53	204	91	11	48	61	37	37
Entschädigungsansätze												
Anzahl Personen	2	1	2	2	4	6	1	1				
Fahrzeuge total	1	1	1	1	4	6	1	1				
Unimog	1	0	1	1	1	1	1	0				
Kehrmaschine (60kW)	0	0	0	0	1	1	0	1				
Kehrmaschine (170kW)	0	0	0	0	0	0	0	0				
Traktor (4-Radantrieb, 60kW)	0	0	0	0	0	0	0	0				
Pony	0	0	0	0	1	1	0	0				
Lastwagen	0	0	0	0	0	2	0	0				
Bus/Auto	0	1	0	0	1	1	0	0				
Gesamtkosten Methode (Gerät, Fahrzeuge, Arbeiter, falls nötig inkl. minimaler mobiler Signalisation)												
total pro Jahr	29551	16414	72952	70178	61803	79152	34390	108585				
pro km und Jahr	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]	[Fr/J]				
pro km (1 Behandlung)	100	55	243	234	206	264	115	362				
pro Einsatzstunde	50	27	61	58	619	1055	38	121				
theoretische Wirkungsbreite	200	109	182	175	433	844	191	121				
(pro m2 und Jahr)	1.00	1.00	0.35	0.35	0.20	0.20	0.10	0.10				
(pro m2 (1 Behandlung))	0.05	0.03	0.09	0.17	3.09	5.28	0.03	0.03				

Anhang C

Mobilität von Glyphosate in Kolonnen mit Kiessand

**Dr. Rolf Wacker
Ernst Aeschimann**

Eidg. Forschungsanstalt Wädenswil, 1995

Bericht

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	2
ZUSAMMENFASSUNG.....	3
EINLEITUNG.....	3
STOFFEIGENSCHAFTEN:	5
MATERIAL UND METHODEN	7
SAULEN	7
APPLIKATION.....	8
<i>Berechnung der Applikationsmengen von Glyphosate</i>	8
<i>Applikationen</i>	9
BEREGNUNG	10
ANALYSEN	11
<i>Geräte</i>	11
<i>Material</i>	11
<i>Methode</i>	12
RESULTATE UND DISKUSSION	13
SAULEN - FÜLLMATERIAL.....	13
ELUAT - WASSER	14
STOFFBILANZ:.....	15
BEREGNUNG	16
EINFLUSS DES VERSUCHSABLAUFES AUF DIE KONZENTRATIONSVERHÄLTNISSE	16
DISKUSSION.....	17
LITERATUR	18

ZUSAMMENFASSUNG

In vier grossen Glaskolonnen ($\varnothing$ 20 cm) mit einer Füllung aus normalem Bankettmaterial der SBB wurde die Verlagerung des herbiziden Wirkstoffes Glyphosate untersucht. Während des 430 Tage dauernden Versuches wurde in einem Zeitraum von 230 Tagen in neun aufeinanderfolgenden Applikationen Roundup Dry auf die Säulen aufgetragen. Pro Anwendung wurde die 2 (low) respektive 20-fache (high) Menge einer Normalapplikation aufgewendet. Zwischen den Applikationen (Zeitraum von ca. 1 Monat) wurde ein durchschnittlicher Halbjahresniederschlag simuliert. Die Bedingungen wurden unter Berücksichtigung der natürlichen Verhältnisse, der tatsächlichen Gegebenheiten an Bahnanlagen und der analytischen Nachweisgrenze berechnet und festgelegt. Sie stellen eine ungünstige, in der Realität wenig erreichte „worst case“-Situation dar. Eluatwasserproben und nach Versuchsende auch die Füllung der Säulen wurden nach Rückständen von Glyphosate und dem ersten Abbauprodukt AMPA (Aminomethylphosphonsäure) untersucht.

Im Eluatwasser konnten bei einer Nachweisgrenze von 2 ppb in beiden Applikationskonzentrationen keine Spuren von Glyphosate nachgewiesen werden. Der Metabolit wurde in den „low“-Säulen in geringen Konzentrationen von wenigen ppb, in den „high“-Säulen in grösseren Konzentrationen bis etwa 2.3 ppm gefunden. Im Füllmaterial wurde Glyphosate bis 15 cm (low) resp. 40 cm Tiefe (high) gefunden. Die Konzentrationen von AMPA im Füllmaterial lagen bei 100-300 ppb (low) und 100-1400 ppb (high).

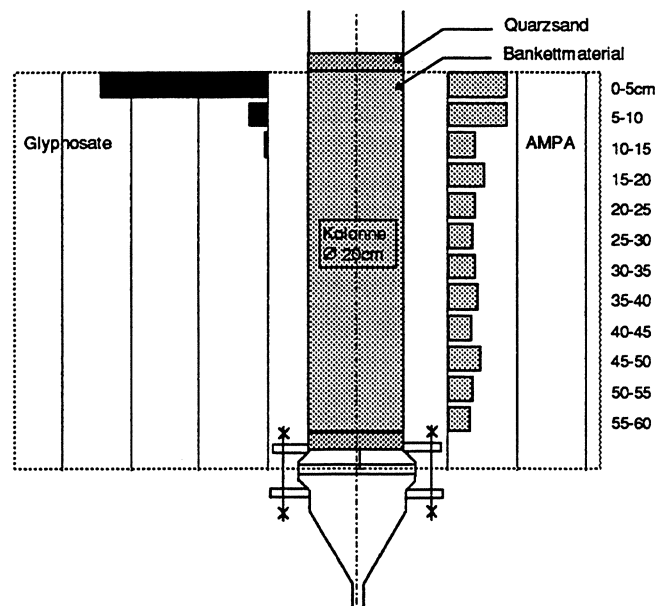


Abbildung 1: Die Balken links und rechts der Säule geben den Konzentrationsverlauf von Glyphosate resp. AMPA an. Beispiel: Säule Nummer 1

EINLEITUNG

Der herbizide Wirkstoff Glyphosate ist in der Landwirtschaft und auch im Nichtkulturlandbereich (Wege, Plätze, Strassen, Bahnen) zunehmend in Verwendung. Das Angebot an Produkten auf der Basis dieses Wirkstoffes hat sich nach dem Auslaufen des Patentschutzes für diesen Wirkstoff wesentlich erweitert, so dass neben dem bekannten Produkt Roundup nun auch andere Mittel, zum Teil auch in Mischung mit weiteren Wirkstoffen (Diuron, Simazin, Terbutylazin, Isoxaben) zur Verfügung stehen. Damit wurden die früher verwendeten Produkte mit den Wirkstoffen Atrazin, Bromacil, Diuron etc. teilweise, respektive in gewissen Bereichen wie den Bahnen und Strassen ganz ersetzt.

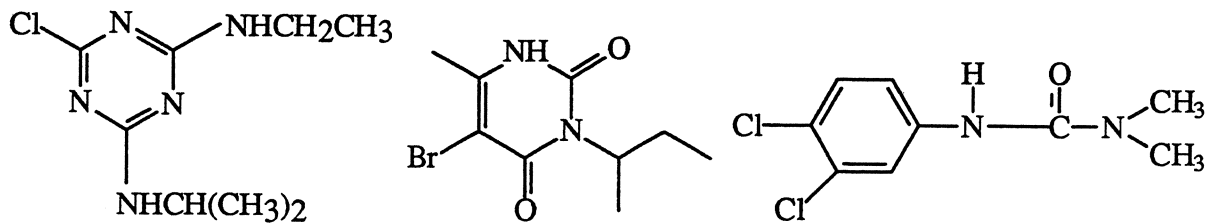


Abbildung 2: Strukturformel des Wirkstoffes Atrazin, Bromacil und Diuron

In Bezug auf das Umweltverhalten kann die Übertragbarkeit der unter landwirtschaftlichen Bedingungen günstigen Stoffeigenschaften von Glyphosate auf andere Bereiche wie zum Beispiel auf Eisenbahnbankette oder Strassenränder zwar angenommen werden, ist aber wegen der gänzlich verschiedenen Bodeneigenschaften nicht gesichert. Diverse Vorversuche wie z.B. Bodendünnschichtchromatogramme und Abbauprobungen mit Bankettmaterial zeigen eine geringe Mobilität und gute Abbaubarkeit in guter Übereinstimmung mit Experimenten aus dem Bereich des Ackerbaus. Diese Versuche können aber nur als Indizien verwendet werden und sind von realen Verhältnissen noch weit entfernt.

Die grundlegende Fragestellung in diesem Bereich betrifft den Einfluss von Glyphosate auf Oberflächengewässer und Grundwasser resp. Trinkwasservorkommen in den genannten Nichtkulturland-Anwendungen. Weitere, relevante nachteilige Aus- und Nebenwirkungen auf Komponenten der Biosphäre sind bisher nicht bekannt. Die möglichen Transportwege für einen Eintrag von Pflanzenschutzmitteln in Grund- und Trinkwasservorkommen unterscheiden sich in einigen Punkten für Bahnen, Strassen und Plätze einerseits und für die Landwirtschaft andererseits. Die möglichen Transportwege sind:

- Transport im Bodenprofil, a) in Lösung oder b) gebunden an Mikropartikel mit dem versickernden Niederschlagswasser. Das Adsorptions- und Desorptionsverhalten an die umgebende Bodenmatrix und die Beschaffenheit der Bodenmatrix selber (humöse, ton- oder mineralische Böden) beeinflussen die Mobilität eines Stoffes. Besonders erwähnenswert ist an dieser Stelle das gegenüber den meisten anderen Herbiziden unterschiedliche Adsorptionsverhalten von Glyphosate in mineralischen Böden. Glyphosate wird in solchen Böden besser zurückgehalten als in humösen Böden, was für noch bessere Eigenschaften im Bereich von Nichtkulturlandböden sprechen würde.
- Austrag über Drainagen oder andere Entwässerungssysteme in Oberflächengewässer.
- Bodenerosion, Austrag in Oberflächengewässer besonders in Hanglagen, versiegelten Flächen (Strassen, Plätze). Im Bereich des Banketts bei Bahnen ist eine Bodenerosion nur bei grösseren Niederschlagsereignissen zu erwarten.
- Sehr hoher oder veränderlicher Grundwasserspiegel.
- Grundwasseranreicherung durch Einspeisung kontaminierter Oberflächengewässer.

Die vorliegende Untersuchung soll in erster Linie das Mobilitäts-, aber auch das Abbauverhalten von Glyphosate in Kies- und Kiessandschichten wie zum Beispiel den Bankettmaterialien der Bahnen nach wiederholten Anwendungen aufzeigen. Die Frage der Mobilität des Wirkstoffes Glyphosate und in der Schlussfolgerung die mögliche Gefährdung von Grundwasser in diesem Anwendungsbereich konnten mit dieser Untersuchung weitgehend abgeklärt werden.

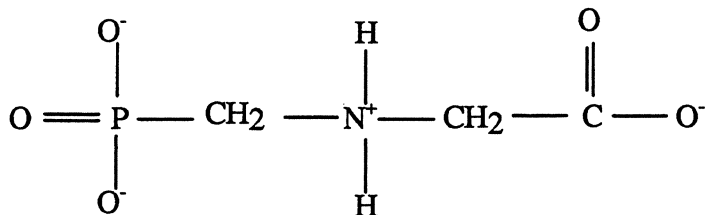


Abbildung 3: Strukturformel von Glyphosate bei pH 7.0 ($pK_1 = 2.27$; $pK_2 = 5.58$; $pK_3 = 10.25$)

Stoffeigenschaften:

Glyphosate:

chemische Bezeichnung:	N - Phosphonomethylglycin
Summenformel:	$\text{C}_3\text{H}_8\text{NO}_5\text{P}$
Molekulargewicht:	169
Dampfdruck:	$2.6 \cdot 10^{-7}$ mmHg bei 45° C
Löslichkeit:	12 g/l Wasser bei 25° C
Schmelzpunkt:	230°C (Zersetzung)
pK:	$pK_1 = 2.27$ $pK_2 = 5.58$ $pK_3 = 10.25$

AMPA:

chemische Bezeichnung:	Aminomethylphosphonsäure
Summenformel:	$\text{CH}_6\text{NO}_3\text{P}$
Molekulargewicht:	111
Dampfdruck:	$3 \cdot 10^{-6}$ mmHg bei 75° C
Löslichkeit:	58 g/l Wasser bei 25° C
Schmelzpunkt:	285° C (Zersetzung 312° C)

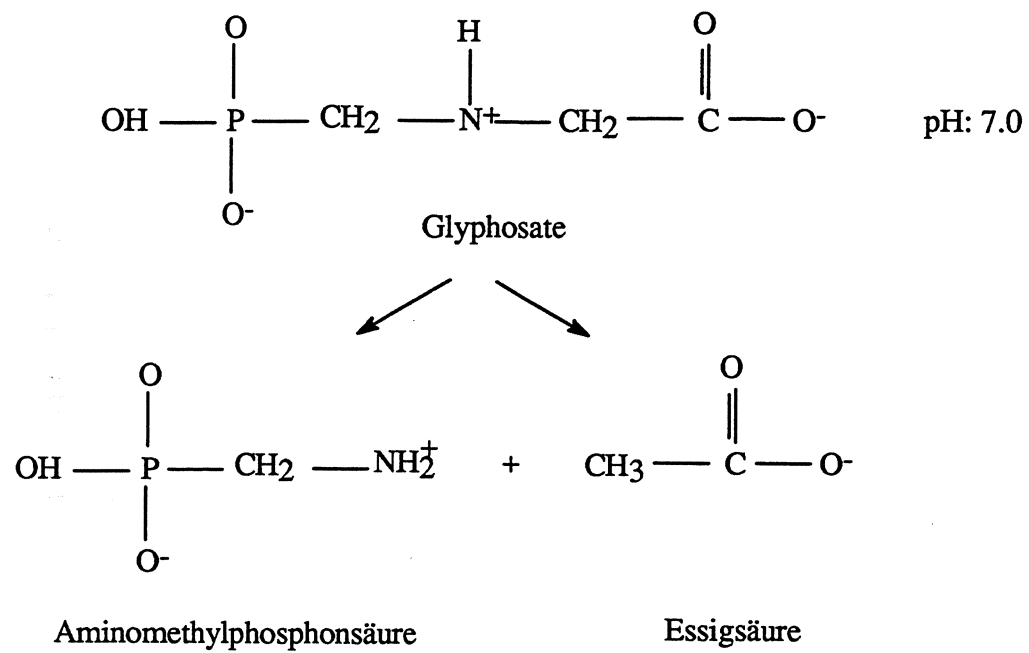


Abbildung 4: Abbau von Glyphosate, Entstehung des Hauptmetaboliten AMPA

MATERIAL UND METHODEN

Säulen

Vier Glaskolonnen von je 100 cm Länge und einem Durchmesser von 20 cm wurden mit Kiessand aus der SBB-Versuchsanlage Schöpfen bis zu einer Höhe von 65 cm gefüllt. Mit geeigneten Massnahmen wurde beim Füllvorgang dafür gesorgt, dass die Dichte des Materials in der Säule in etwa der Tatsächlichen entspricht. Als oberer und unterer Abschluss wurde eine 3 cm dünne Quarzsandschicht ($\varnothing$ 4 mm) eingebaut. Die obere Schicht bezweckte eine optimale Verteilung der Spritzbrühe und des Niederschlages auf der Säule; die untere Schicht verhinderte ein mögliches Auswaschen des Kiessandmaterials. Die Kolonnen befanden sich während der gesamten Versuchsdauer in einem wenig geheizten Kellerraum bei einer Temperatur von annähernd 20° C und in mässiger Dunkelheit. Der untere Abschluss der Säulen bestand aus einem rostfreien Stahlsieb, gefasst in zwei Teflondichtungen.

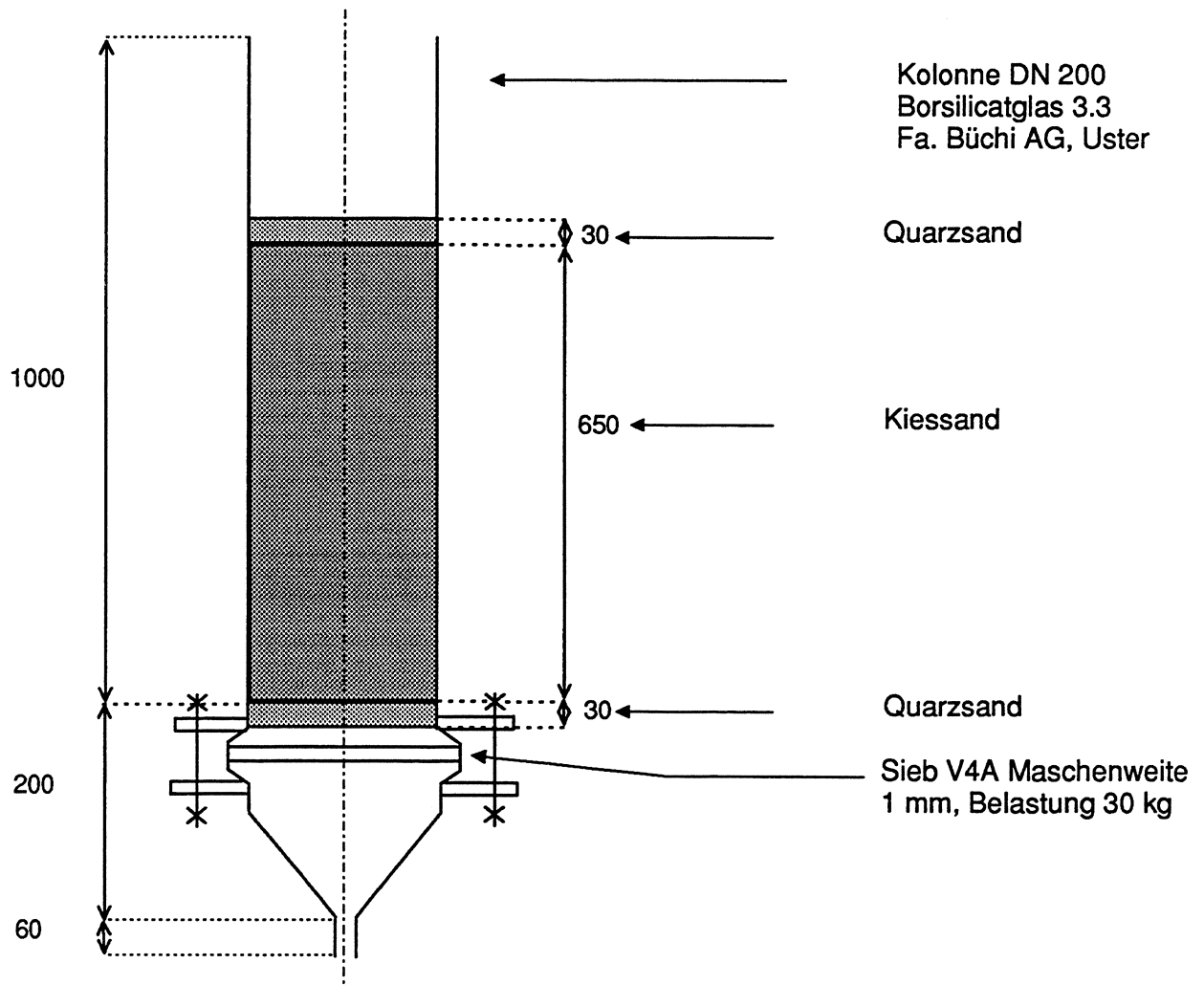


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Säule

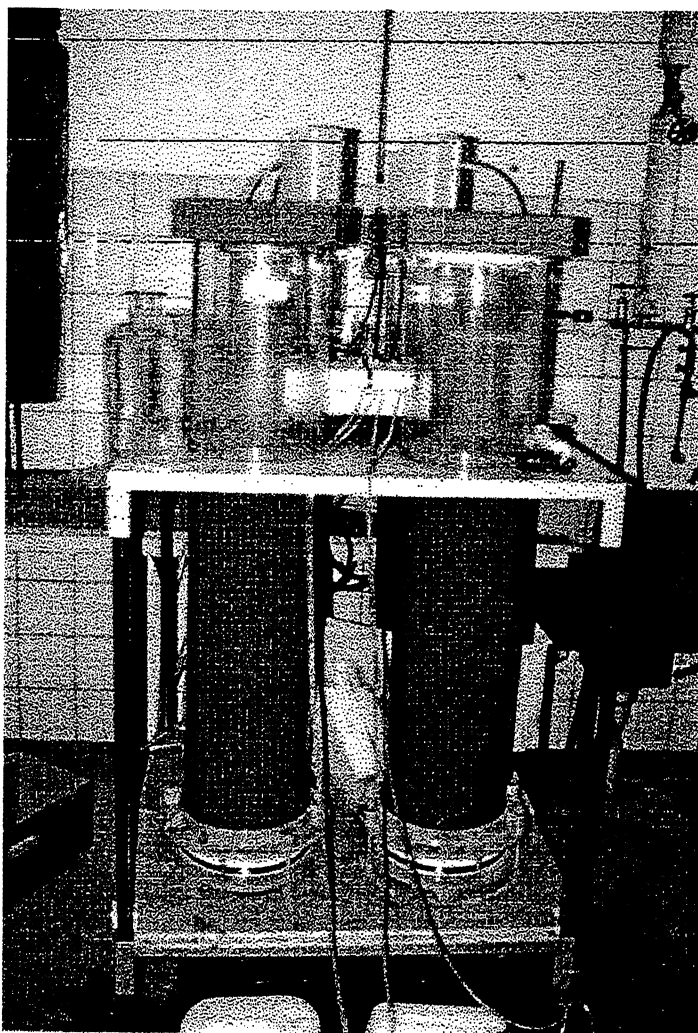


Abbildung 6: Versuchsanlage, Ansicht

Applikation

Berechnung der Applikationsmengen von Glyphosate

Die Konzentration in den verwendeten Applikationslösungen wurde aufgrund der Bewilligung für das Produkt Roundup Dry und Abschätzungen in der Wiederfindung mit der verwendeten Analysenmethode berechnet. In den folgenden Abschnitten sind die dazu benutzten Parameter und Berechnungen aufgezeigt.

Berechnung der „normalen“ Aufwandmenge:

Die folgende Abschätzung der Aufwandmenge wurde aufgrund der Bewilligung vom 1.1.1994 für das Produkt Roundup Dry (Sandoz) durchgeführt. Die maximal bewilligte Aufwandmenge in Nichtkulturland beträgt 8.5 kg/ha (850 mg/m²). (1.)

Roundup Dry: Gehalt: 420 g a.i./kg Formulierung (2.)

Aufwandmenge a.i. pro m²: (3.)

$850 \text{ mg Formulierung pro m}^2 \cdot 420 \text{ } \mu\text{g a.i./mg Formulierung} = 357 \text{ mg a.i./m}^2$

$$\text{Fläche der Kolonne: } \pi \cdot (10 \text{ cm})^2 = 314 \text{ cm}^2 \quad (4.)$$

$$\text{Aufwandmenge pro Kolonne (a.i.): } 204 \text{ mg/m}^2 \cdot 0.0314 \text{ m}^2 = 11.2 \text{ mg a.i. pro Kolonne bei Verwendung der maximal bewilligten Aufwandmenge} \quad (5.)$$

Berechnung der minimalen Aufwandmenge

Mit der verwendeten Analysenmethode konnte der Wirkstoff Glyphosate in Konzentrationen minimal bis zu 2 ppb nachgewiesen werden. Die folgende Berechnung diente der theoretischen Abschätzung der minimal aufzutragenden, noch nachweisbaren Menge Wirkstoff.

Es wurde angenommen, dass sich die applizierte Wirkstoffmenge in maximal einem Halbjahresniederschlag von 21.5 l Wasser (pro Säule) verteilt (13). (6.)

Die Nachweisgrenze für Glyphosate lag bei der verwendeten Methode bei wenigen ppb, abhängig von den Verunreinigungen in der Probe selbst. Für die Berechnung wurde deshalb eine Nachweisgrenze von 5 ppb angenommen. (7.)

Der grösste Teil des Wirkstoffes wird an die Bodenmatrix gebunden. Für die Berechnungen wurde deshalb davon ausgegangen, dass bis zu 99 % adsorbiert werden. (8.)

Aus 6, 7 und 8 resultierte eine minimale Applikationsmenge:
 $5 \text{ µg/l} \times 100 \times 21.5 \text{ l} = 2150 \text{ µg} = 10.75 \text{ mg a.i. pro Kolonne}$ (9.)

Berechnung der Applikationslösung

In der Praxis kann die applizierte Menge mit der Rückenspritze nicht immer genau dosiert werden. Gesamthaft wird, wie die Erfahrung zeigt, die maximale Applikationsmenge unterschritten - bei der punktuellen Behandlung von Unkraut ist eine Überdosierung aber nicht immer auszuschliessen. Die im Versuch verwendeten Aufwandmengen wurden auch deshalb gegenüber der bewilligten Maximaldosierung (5) erhöht. In den Säulen 1 und 4 wurde die doppelte, in den Säulen 2 und 3 die 20-fache maximale Aufwandmenge appliziert.

2 g Roundup Dry (Sandoz) wurden in exakt 100 ml Wasser aufgelöst (= 2 %ige Lösung). Die Konzentration in dieser Lösung entspricht 8.4 mg/ml aktivem Wirkstoff Glyphosate.

Bei der Applikation von 2.7 resp. 27 ml dieser Lösung wurden **22.7 resp. 227 mg a.i. pro Kolonne** aufgetragen. Dies entspricht der 2 resp. 20-fachen Menge einer „Normal“-Anwendung.

Applikationen

Auf den Säulen 1 und 4 wurden je 2.7 ml, auf den Säulen 2 und 3 je 27 ml der Applikationslösung mit einer Pasteurpipette direkt auf die Quarzsandschicht verteilt. Der Zeitpunkt der Anwendung wurde so gelegt, dass das nächste „Regenereignis“ erst einige Stunden später ausgelöst wurde. Es wurden 9 Applikationen im Abstand von ungefähr einem Monat (Ausnahme 6. - 7. Applikation, Stillstand wegen eines Pumpendefektes) durchgeführt.

Tabelle 1: Applikationsdaten

1.9.1993	1. Applikation	Probe Nr. 1
30.9.1993	2. Applikation	Probe Nr. 30
3.11.1993	3. Applikation	Probe Nr. 65 am 4.11.1993
29.11.1993	4. Applikation	Probe Nr. 89 am 28.11.1993
21.12.1993	5. Applikation	Probe Nr. 112
19.1.1994	6. Applikation	Probe Nr. 145 am 21.1.1994

17.3.1994	7. Applikation	Probe Nr. 200
21.4.1994	8. Applikation	Probe Nr. 230 am 19.4.1994
31.5.1994	9. Applikation	Probe Nr. 275
5.11.1994		Letzte Probenahme Nr. 433

Beregnung

Die automatische Beregnung erfolgte diskontinuierlich dreimal täglich. Hierzu wurde ein über der Säule liegender Wasserbehälter (1) langsam mit einer Pumpe (2) angefüllt (ca. 40 ml/h Pumpenleistung). Überschüssiges Wasser wurde über den Überlauf (3) abgeleitet. Nach 8 Stunden wurden durch die Öffnung des Magnetventils (4) 250 ml Wasser über den Verteiler (5) als künstlicher Regen auf die Säule (6) gegeben (Abb. 7). Die Dauer der Beregnung betrug wenige Minuten. Anschliessend wurde das Magnetventil wieder für weitere 8 Stunden geschlossen und der Kreislauf von neuem gestartet. Die innerhalb von 30 Tagen simulierte Regenmenge entsprach einem Halbjahresniederschlag (13).

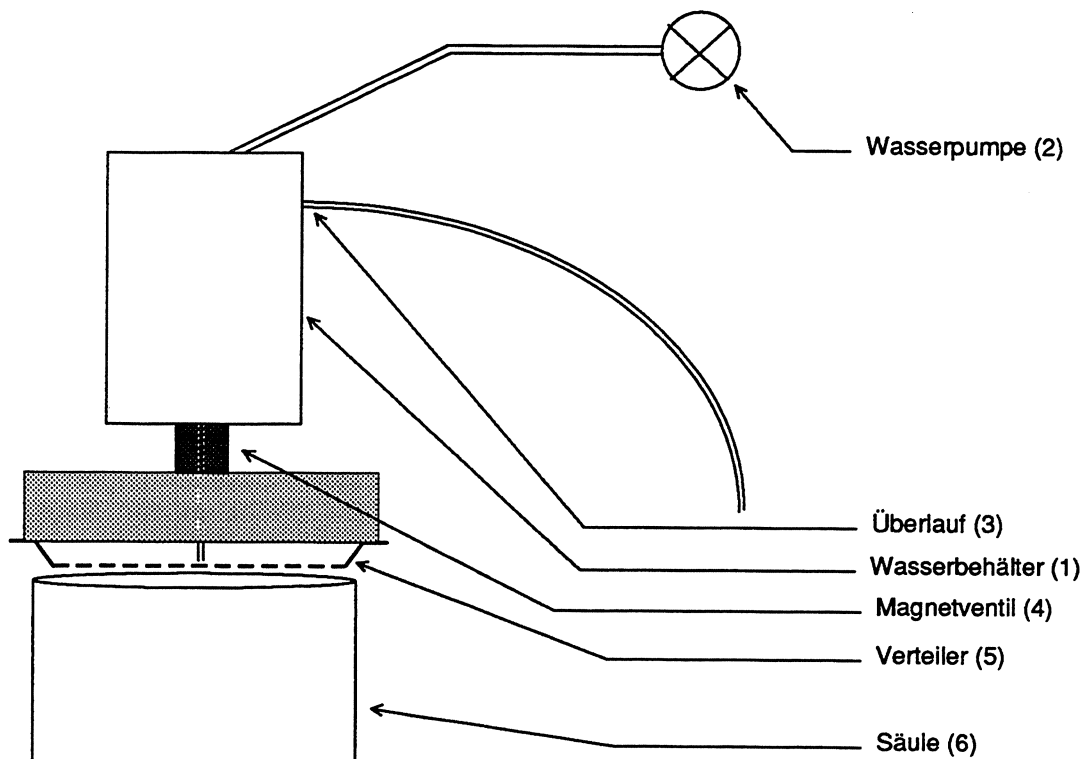


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Beregnungsanlage

3 x pro 24 h je 250 ml = 750 ml/Tag (10.)

250 ml/Beregnung auf einer Fläche von 0.031 m² = 7.85 mm/Niederschlag (11.)

3 Beregnungen/Tag => 23.6 mm/Tag (12.)

pro 30 Tage: ≈ 700 mm (13.)

Jahresniederschlag Wädenswil 1368 mm (langjähriger Durchschnitt) (14.)

=> Halber Jahresniederschlag zwischen 2 Behandlungen resp. 1 Monat.

Besonderheiten

Die Versuchsdauer betrug insgesamt 430 Tage. Während dieser Zeit traten gesamthaft nur wenige Störungen oder Unregelmässigkeiten auf, welche nachfolgend dokumentiert sind:

- 1.1.1993: Beregnung in den ersten 13 Tagen: 1x pro Tag 250 ml.
- 20.9.1993: Probleme mit der Beregnung, über kurze Zeit instabil. Säule 3 und 1 zuviel Regen.
- 29.9.1993: Säulen 2 und 3 haben geringfügig weniger Niederschlag -> Schläuche der Pumpe ausgewechselt.
- 25.10.1993: Säule 3 und 4: Dichtungen unten undicht, ausgebaut, gereinigt, neu montiert.
- 25.11.1993: Pumpe für die Beregnung kurzfristig ausgefallen.
- 20.12.93: Pumpe für die Beregnung für einen Tag ausgefallen.
- 19.1.1994: Probenentnahmesystem entkalkt und gereinigt (mit Säure)
- 16.2.1994: Beregnungspumpe ausgefallen, kein Regen bis 15.3.1994 (Reparatur Pumpe)
- 24.8.1994: Probenahme für Säule 3 unklar (Probe Nr. 340.3)
- 15.11.1994: Versuchsende

Analysen

Geräte

pH-Meter: Metrohm 654 pH-Meter

HPLC-Pumpe: Spectra Physics SP8750 (Thermo Separation Products)

Autosampler: Jasco, 851 AS, Omnilab AG

Detektion: Linear Fluor LC304 (Thermo Separation Products)

Datensystem: DataJet Integrator (Thermo Separation Products)

Filter: Chromafil Einmalfilter, Typ A-20/25, Porendurchmesser: 0.2 µm, Filterdurchmesser: 25 mm (Machery Nagel)

HPLC - Säule: ET 250/8/4 Nucleosil 120-5 C18 (Macherey Nagel)

Material

Glyphosate Analytical Standard 99 % Reinheit, (FAW)

Borsäure (Siegfried)

Wasser, bidestilliert, HPLC-Grade

Acetonitril, HPLC-Grade, (Biosolve Ltd.)

NaOH - Lösung (ca. 1 M), (Fluka Chemie AG)

Chlorameisensäure-(9-fluorenylmethyl)-ester, Fmoc-Cl, (Fluka Chemie AG)

Aceton, (Fluka Chemie AG)

Cyclohexan, (Fluka Chemie AG)

Phosphorsäure, (Fluka Chemie AG)

Salzsäure, (Fluka Chemie AG)

Lösungen:

- Boratpuffer: 2 g Borsäure in 40 ml Wasser suspendieren und pH mit ca. 1 M NaOH auf pH 8.5 einstellen. Entspricht ca. 0.8 M Borsäure. (Löst sich erst im basischen Bereich vollständig)
- Salzsäure verdünnt, 1:10
- Aceton/FMOC-Cl: 15 mg FMOC-Cl lösen sich in 20 ml Aceton
- Solvent C: 16 g Phosphorsäure in 1600 ml Wasser verdünnen, 400 ml Acetonitril
- Solvent A: Acetonitril (100 %)

Methode

Bodenproben

Zu 10-15 Gramm der Bodenprobe wurde exakt dieselbe Menge 0.01 N NaOH - Lösung gegeben, verrührt und mindestens eine Stunde stehen gelassen. Die wässrige Phase wurde in ein Zentrifugenröhrchen abdekantiert und für 10 Minuten bei 10'000 rpm zentrifugiert. Der partikelfreie Überstand wurde sorgfältig mit einer Pasteurpipette in ein 20 ml - Röhrchen überführt und mit wenigen Tropfen verdünnter Salzsäure auf pH 7 neutralisiert. Der so gewonnene Extrakt wurde anschliessend gleich wie eine wässrige Probe weiterverarbeitet und analysiert.

Wässrige Proben

Die Proben wurden direkt in Probenfläschchen (Vials) für die Analyse mit dem automatischen Probengeber vorbereitet. In einem Vial mit einem Gesamtvolumen von 2 ml wurden zu 0.5 ml Probe 50 µl Boratpuffer und 0.5 ml der FMOC-Lösung zugegeben und gut durchmischt. Nach 8 Minuten wurde die Derivatisierungsreaktion mit 0.5 ml Cyclohexan und 2 Tropfen verdünnter Salzsäure beendet, die Probe verschlossen und gründlich durchmischt (schütteln). Die Proben wurden so vorbereitet, dass die Analyse innerhalb der nächsten 12 Stunden erfolgen konnte. Die Eintauchtiefe der Nadel des Probennehmers wurde so eingestellt, dass die Messprobe im unteren, wässrigen Teil des Zweiphasengemisches genommen wurde.

Eichgeraden

Die Eichgeraden für Glyphosate und AMPA wurden für jede Versuchsserie neu bestimmt. Im Bereich von 20 bis einigen hundert ppb konnte aus der Peakfläche die entsprechende Konzentration mit hoher Zuverlässigkeit bestimmt werden. Für geringere Konzentrationen wurde eine andere, tieferliegende Eichgerade verwendet, für höhere Konzentrationen wurden die Werte anhand dieser Geraden abgeschätzt.

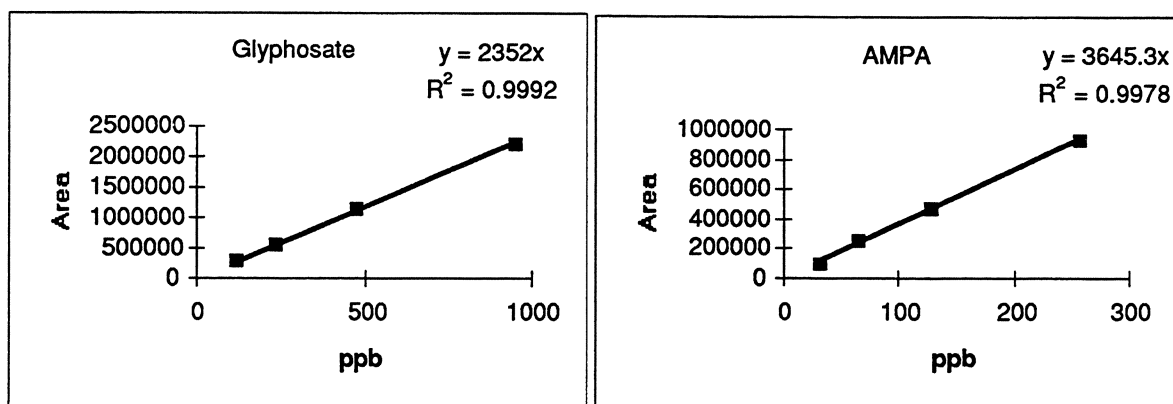


Abbildung 8: Eichgeraden von Glyphosate und AMPA (für grössere AMPA-Konzentrationen wurde eine weitere Gerade im entsprechenden Konzentrationsbereich verwendet).

RESULTATE UND DISKUSSION

Im Unterhaltsdienst von Eisenbahnen und Strassen werden die Randzonen und Bankettgehwege mit verschiedenen Mitteln zur Verhinderung von Schäden vor eindringendem Pflanzenbewuchs befreit. Als Mittel werden neben baulichen Massnahmen Pflanzenbehandlungsmittel eingesetzt. Frühere, persistenter und mobilere Wirkstoffe wurden in den letzten Jahren durch den leichter abbaubaren und weniger mobilen Wirkstoff Glyphosate ersetzt. Die Untersuchung des Verhaltens - der Verlagerung und des Verschwindens - dieses Wirkstoffes unter diesen speziellen Bedingungen und der damit verbundenen Umweltrelevanz war das Ziel des vorliegenden Versuches. Hierzu konnten die aus früheren Versuchen mit den Bodenherbiziden Atrazin, Oryalin, Flurochloridon verwendeten und bestens bewährten Glaskolonnen eingesetzt werden. Die realen Bedingungen konnten mit diesem Versuchsaufbau weitgehend nachempfunden werden (grosser Säulendurchmesser - wenig Randeffekte; Füllmaterial = unbehandeltes, originales Bankettmaterial; periodische Beregnung etc.), ohne bereits auf einen Freilandversuch ausweichen zu müssen. Mit einem periodischen Niederschlag von 8 mm alle 8 Stunden wurde eine technisch anspruchsvollere Beregnung gewählt, welche den natürlichen Gegebenheiten (Trocken- und Nassperioden) entspricht.

Der Verbleib der auf die Säulen aufgetragenen Mengen Glyphosate wurde im Eluatwasser und nach Abschluss des Versuches im Füllmaterial untersucht. Dazu wurden die Proben nach Restmengen des aktiven Wirkstoffes und des ersten Abbauproduktes (AMPA) analysiert (Nachweisgrenze: ≈ 2 ppb).

Säulen - Füllmaterial

In Säulen mit niedriger Dosierungsmenge (low) konnte Glyphosate bis in eine Tiefe von 15 cm, in denjenigen mit hoher Dosierungsmenge (high) bis 40 cm gefunden werden (Abbildung 9 und Abbildung 10). Durch die hohen Aufwandmengen, die schnelle Applikationsfolge und den verhältnismässig raschen Abbau von Glyphosate bildeten sich in der Säule grössere Mengen des stabileren und mobileren Metaboliten AMPA. Dieser konnte dementsprechend auf der gesamten Säulenlänge wiedergefunden werden. Die Konzentrationen waren in den „low“-Säulen unterschiedlich gleichbleibend ohne eindeutige Tendenz, in den „high“-Säulen gegen das Säulenende ansteigend.

158 Tage nach der letzten, neunten Applikation und 433 Tage nach Versuchsbeginn lagen die Maximalkonzentrationen von Glyphosate im Bereich von einigen hundert ppb (low) bis wenigen ppm (high).

Die Resultate in den je zwei Wiederholungen stimmen sehr gut überein und dokumentieren die definierten Säuleneigenschaften und Versuchsbedingungen. Die Variabilität der untersuchten Matrix ist gegenüber entsprechenden Freilandversuchen geringer, womit in diesem sonst schon komplexen System nicht noch weitere unbekannte Parameter eingeführt wurden. Die gefundenen Ergebnisse sind somit kein Zufallsprodukt aus einem nicht überschaubaren System mit unbekannten Eigenschaften.

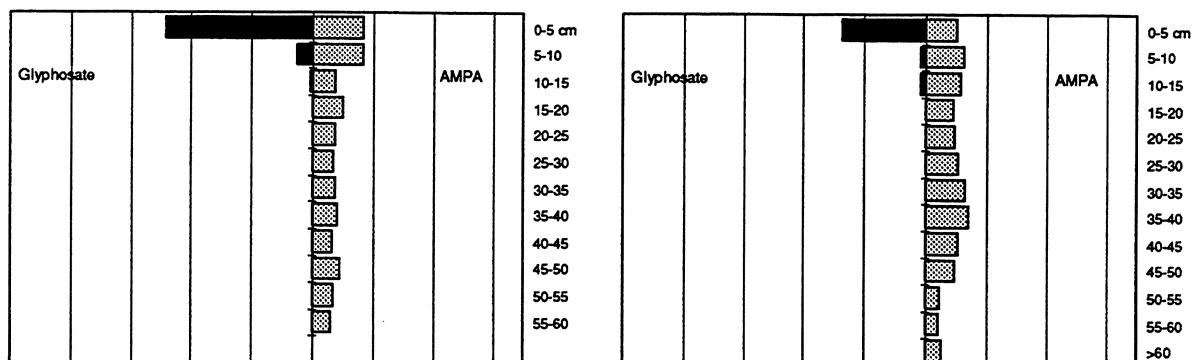


Abbildung 9: Konzentration von Glyphosate und AMPA in den Säulen 1 und 4 mit niedriger Dosierung (1 Unterteilung entspricht 630 ppb resp. 4 mg absoluter Menge pro Segment)

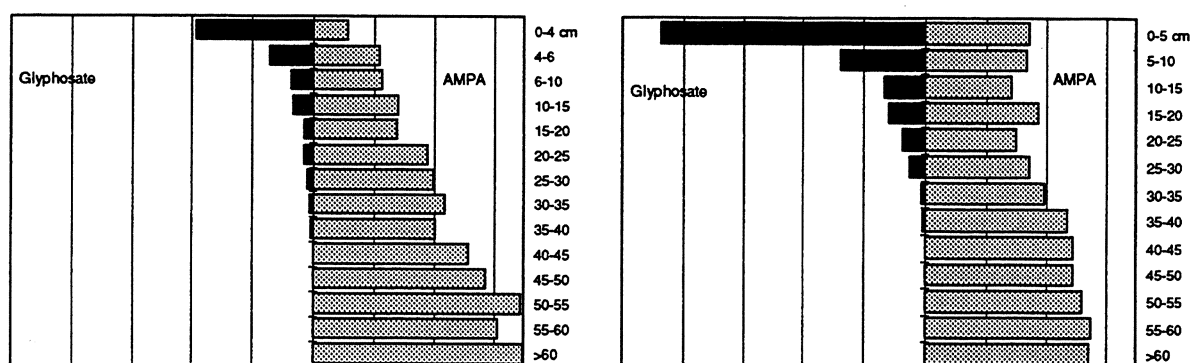


Abbildung 10: Konzentration von Glyphosate und AMPA in den Säulen 2 und 3 mit hoher Dosierung (1 Unterteilung entspricht 630 ppb resp. 4 mg absoluter Menge pro Segment)

Tabelle 2: Summe der Mengen an Glyphosate und AMPA (Stoffbilanz) im Säulenmaterial:

		Glyphosate	AMPA	Summe bezogen auf Gly
Säule 1	low	5.5 mg	11 mg	22.2 mg
Säule 4	low	3 mg	12.4 mg	21.9 mg
Säule 2	high	7.7 mg	58 mg	96.0 mg
Säule 3	high	15.5 mg	54.3 mg	98.2 mg

Eluat - Wasser

Die Abbildung 11 zeigt den Konzentrationsverlauf von AMPA im Eluatwasser. Für Glyphosate kann keine solche Kurve erstellt werden, der native Wirkstoff wurde in keiner der Proben gefunden.

Die Konzentrationen im Eluatwasser der „low“-Säulen sind uneinheitlich, übersteigen die Nachweisgrenze nach 200-250 Tagen und erreichen einen Maximalwert 60 ppb. Dieser Wert wird nach rund 350 Tagen erreicht, rund 100 Tage nach der letzten Applikation.

In den „high“-Säulen konnte der Metabolit AMPA nach Ablauf von 60 Tagen gefunden werden. Die Konzentrationen stiegen innerhalb von 30-60 Tagen auf Werte bis zu 2.3 ppm an und verharrten auf diesem Niveau bis 30 Tage nach der letzten Anwendung. Die Abnahme der Konzentration konnte innerhalb der Beobachtungsperiode bis auf niedrige Werte verfolgt werden und dürfte innerhalb kurzer Frist danach auf sehr geringe oder gar nicht mehr feststellbare Werte absinken.

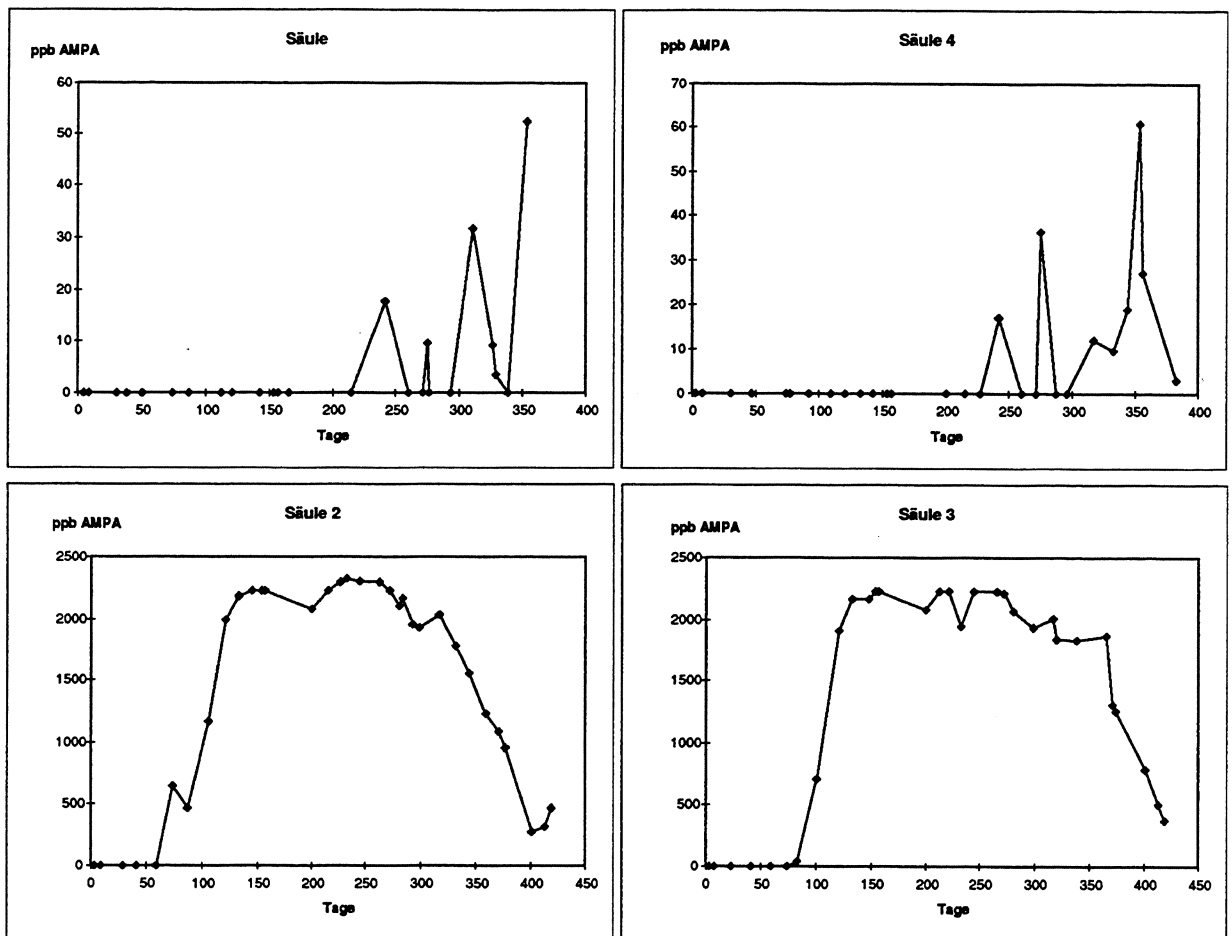


Abbildung 11: Konzentrationsverlauf von AMPA im Eluatwasser der Säulen 1-4

Stoffbilanz

In einer überschlagsmässigen Kalkulation wurde das Integral der eluierten AMPA-Mengen in den Säulen 2 und 3 abgeschätzt. Diese betrugen 440 mg (670 mg) für die Säule 2 und 410 mg (625 mg) für die Säule 3 (in Klammern bezogen auf Molekulargewicht von Glyphosate). Dies entspricht rund 30 % der eingesetzten Menge (bezogen auf 2043 mg total aufgetragene Menge Glyphosate, alle Applikationen kumuliert).

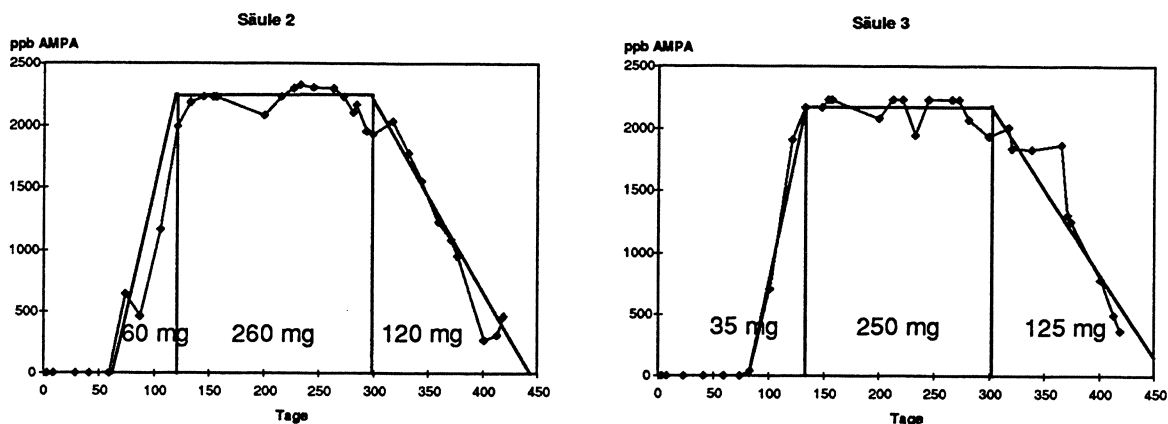


Abbildung 12: Bilanzierung der Menge AMPA im Eluat

Tabelle 3: Stoffbilanz Eluat und Säulenfüllmaterial:

Säule	Typ (in Klammern die total aufgetragene Menge Glyphosate)	Summe bezo. auf Glyphosat Glyphosate und AMPA im Füllmaterial	Summe bezo. auf Glyphosat Glyphosate und AMPA im Eluat	Summe bezo. auf Glyphosat Eluat + Füllmaterial	Recovery bezogen auf die total aufgetragene Menge Glyphosat
1	low (204 mg)	22.2 mg	-	22.2 mg	10.9 %
4	low (204 mg)	21.9 mg	-	21.9 mg	10.7 %
2	high (2043 mg)	96.0 mg	670 mg	766.0 mg	37.5 %
3	high (2043 mg)	98.2 mg	625 mg	723.2 mg	35.4 %

Abbildung 13: Integral von AMPA im Eluatwasser der "high"-Säulen.

Im Eluat und der Säulenfüllung konnten nach Versuchsabschluss rund 11 resp. 37 % (low / high) der eingesetzten Wirkstoffmenge wiedergefunden werden. 89 resp. 63 % des Wirkstoffes wurden während der Versuchsdauer vollständig abgebaut.

Beregnung

Für die Beregnung wurde normales Leitungswasser ($\cong$ pH 7.0) verwendet. Das pH von Regenwasser liegt normalerweise zwischen 4.0 und 6.0. Die Verwendung von Leitungswasser anstelle von saurerem Regenwasser hat auf die Mobilität kaum einen Einfluss. Mit steigendem pH (basischer) nimmt die Mobilität leicht zu (RUEPPEL et al. 1977). Unter den gewählten Versuchsbedingungen ist somit, wenn überhaupt, eine eher höhere Mobilität als unter Freilandbedingungen zu erwarten.

Einfluss des Versuchsablaufes auf die Konzentrationsverhältnisse

Das Experiment wurde in einem Zeitraffer mit 6-facher Geschwindigkeit gegenüber der Realität durchgeführt. Als Folge tritt ein in der Realität nicht möglicher Kumulationseffekt auf. Die theoretischen Szenarien mit Halbwertszeiten von 10 und 50 Tagen zeigen die höheren Konzentrationen auf, zu welchen dieser Effekt führt (Abb. 14). Diese Akkumulation ist im Freiland nicht zu erwarten, da die Spritzabstände im Minimum (Frühjahr / Herbst) 5 Monate resp. ca. 150 Tage betragen, üblicherweise aber 1 Jahr dauern. In dieser Zeit wird Glyphosate, wie auch die geringen zurückbleibenden Mengen im Füllmaterial der Säulen zeigen, bis auf einen unwesentlichen Rest abgebaut.

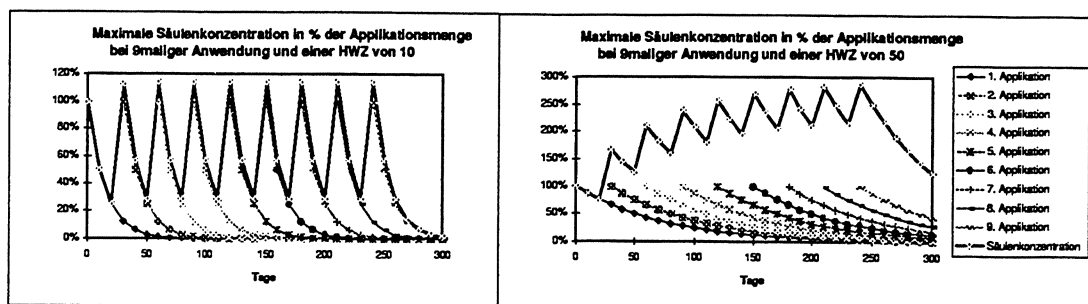


Abbildung 14: Szenarien der Maximalkonzentrationen bei verschiedenen HWZ.

Diskussion

Das Herbizid Glyphosate wird seit Jahren in zunehmendem Ausmass in den verschiedensten Teilen der Landwirtschaft eingesetzt. Das Verhalten der Verbindung ist unter diesen Bedingungen weitgehend untersucht und auch verstanden. Die Verwendung in Bahnanlagen, Strassenrändern, auf Wegen und Plätzen stellt eine Spezialanwendung dar. Die Verhältnisse sind mit denjenigen in der Landwirtschaft bedingt vergleichbar. Die Verwendung von Pestiziden in diesem Umfeld stellt zusätzliche Anforderungen an die chemisch / physikalischen Eigenschaften des Wirkstoffes und an die qualifizierte Ausführung der Applikation.

Das Schicksal einer Verbindung wird durch eine Fülle von immer wechselnden Faktoren bestimmt. Diese sind, mit unterschiedlicher Gewichtung, in einem komplexen Gefüge voneinander abhängig. Die Mobilität wird durch drei Hauptfaktoren beeinflusst: die physikalisch / chemischen Eigenschaften des Wirkstoffes, die Eigenschaften des Bodens und die meteorologischen Einflüsse. Der Abbau des Stoffes ist abhängig von der biologischen Aktivität, der Abbaubarkeit an und für sich, der Mobilität und der Adsorption an die Bodenmatrix. Gegenüber den meisten anderen Pflanzenschutzmitteln spielt Glyphosate insofern eine Sonderrolle, als die ionischen Eigenschaften im Vordergrund stehen und das Verhalten bestimmen. Die Adsorption an die mineralische Bodenmatrix ist höher als an humöse Böden, und dies verändert schon beim Eintritt in den Boden das Verhalten.

Das zeigt sich schon bei der Ausbringung des Stoffes. Auch die technisch ausgereifteste Applikationsapparatur wird nicht verhindern, dass ein Grossteil der Aufwandmenge den Zielort, das Blatt, nicht erreicht. Dieser Umstand ist für Glyphosate oder allgemeiner für Blattherbizide nicht spezifisch, sondern allgemein bekannt. Die Anwendung erfolgt, als Resultat intensiver Bemühungen und der Umsetzung der bekannten Tatsachen in die Praxis, bei der Bahn und Strasse möglichst nur noch auf bewachsene Abschnitte. Die wirksame Aufwandmenge wird verbessert, der Verbrauch ohne Verlust an Wirkung vermindert. Ein Bewuchs ist nach einem Neubau der Geleiseanlagen erst nach mehreren Jahren durch wenige Pionierpflanzen im kargen Boden mit einem geringen über Windverfrachtung eingetragenen Humusanteil feststellbar. Die Mobilität des Wirkstoffes verändert sich dadurch nicht, dafür der Abbau aufgrund der grösseren Menge an metabolisierendem Biomaterial. Das Gleichgewicht zwischen freiem, metabolisierbarem Glyphosate und adsorbiertem Wirkstoff liegt auf der Seite des gebundenen Agens. Die Resultate aus den Säulenversuchen zeigen, dass auch nach 200 Tagen nach der letzten Anwendung, also über 10 Halbwertszeiten später, immer noch einige % des Wirkstoffes in den obersten Schichten vorhanden sind.

Im vorliegenden Experiment wurden gegenüber einer „normalen“ Applikation die 2- und 20-fache Menge verwendet. Der Grund hierfür liegt in der bereits gewonnenen Erfahrung mit diesem Stoff, welche zeigt, dass Rückstände bei normalen Applikationsmengen nicht mehr nachweisbar sind. Um die Elastizität des Systems auszuloten und das Verhalten an sich verstehen zu können, wurden höhere und damit auch messbare Konzentrationen und ausserordentliche Umweltbedingungen gewählt. Die theoretischen Überlegungen und Berechnungen zu den gewählten Applikationsmengen haben sich bestätigt - die niedrige

Aufwandmenge führt zu gerade noch nachweisbaren Mengen an AMPA im Eluat. Glyphosate ist nur wenig mobil und verbleibt auch bei 20-facher Überdosierung auf der Säule, bleibt im Eluatwasser aber unauffindbar.

Die Beurteilung von Rückstandsmengen aus Pflanzenschutzmitteln in Eluatwasserproben oder in Bodenproben gestaltet sich aufgrund uneinheitlicher und oft undurchsichtiger Richt-, Toleranz- und Grenzwerte schwierig. In der Schweiz gilt gemäss der Verordnung über „Fremd- und Inhaltsstoffe in Lebensmitteln“ (FIV) für Pflanzenschutzmittel in Trinkwasser ein allgemeiner nicht weiter spezifizierter Wert von 0.1 µg/l Wasser. Der Toleranzwert ist definiert als Höchstkonzentration eines Stoffes, bei deren Überschreitung das Lebensmittel von der Vollzugsbehörde beanstandet wird (Art 2 Abs 3) und ist nicht zu verwechseln mit dem Grenzwert „...bei deren Überschreitung das Lebensmittel für die menschliche Ernährung als ungeeignet gilt.“ (Art 2 Abs 3). Für die Summe aller im Trinkwasser enthaltenen Pestizide gilt der Toleranzwert von 0.5 µg/l. Im Gegensatz zur Schweiz werden in Deutschland dieselben Werte jedoch als Grenzwerte verwendet. Die Problematik dieser pauschal festgelegten Grenzwerte liegt sowohl in der (toxikologischen) Begründung wie auch in der Kontrolle, da für die meisten dieser Stoffe in diesem Ultraspurenbereich keine zuverlässigen Methoden zur Verfügung stehen (Fehler >100 %). Mit den Zusätzen „toxikologisch bedeutsamen Folgeprodukte“ resp. „einschliesslich ihrer toxischen Hauptabbauprodukte“ wird in der schweizerischen wie auch der deutschen Gesetzgebung auf die Abbauprodukte eingegangen, ohne diese näher zu definieren. Als Alternative kann die gesundheitsbezogene Beurteilung von Grenzwertüberschreitungen mit den toxikologisch begründeten ADI Werten (resp. den deutschen Werten für die duldbare tägliche Aufnahme, DTA) erfolgen. Der ADI wird durch die WHO aufgrund weitreichender toxikologischer Abklärungen festgelegt und enthält zwischen empfindlichster Tierspezies und Mensch einen Sicherheitsfaktor (meist 100). Für Glyphosate liegt dieser Wert bei 0.3 mg/kg Körpergewicht und Tag resp. 21 mg/Tag (Basis: 2 l/d, 70 kg). Daraus ergibt sich ein toxikologisch unbedenklicher Wert von 1050 µg/l, das rund 10'000fache des Toleranzwertes (CH) resp. Grenzwertes (D). Im Vergleich mit diesen Zahlen können die Resultate aus dem Versuch ausserordentlich günstig gewertet werden.

Nach den heutigen Erkenntnissen ist bei vorschriftsgemässer, normaler Anwendung auf Nichtkulturlandflächen, sofern die Verhältnisse sich nicht vollständig von denjenigen im Versuch unterscheiden, keine Überschreitung der Toleranzwerte in Grund- resp. Trinkwasser zu erwarten. Eine toxikologisch relevante Konzentration kann - Unfälle vorbehalten - nahezu ausgeschlossen werden.

Ein besonderes Augenmerk gilt allerdings weiterhin Situationen, in denen das Bodenprofil für den raschen Abfluss von Wasser vorbereitet wurde, da sich diese vom untersuchten „Normalfall“ wesentlich unterscheiden.

LITERATUR

RUEPPEL, M.L., BRIGHTWELL, B.B., SCHAEFER, J. and MARVEL, J.T. (1977). Metabolism and degradation of glyphosate in soil and water, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **25**(3), 517-528

SPRANKLE, P., MEGGITT, W.F. and PENNER, D. (1975). Adsorption, mobility, and microbial degradation of glyphosate in the soil, *Weed Science*, **23**, 229-234.

DFG, Deutsche Forschungsgemeinschaft. Pflanzenschutzmittel im Trinkwasser, VCH, 1990

Schweizerische Verordnung über Fremd- und Inhaltsstoffe in Lebensmitteln (Fremd- und Inhaltsstoffverordnung, FIV) vom 27. Februar 1986.

IPCS, International Programme on Chemical Safety. Environmental Health Criteria 159: Glyphosate. WHO 1994.