



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Energie BFE**  
**Bereich Prozess- und Betriebsoptimierung**

In Zusammenarbeit mit Seilbahnen Schweiz SBS

# ENERGETISCHE BEDEUTUNG DER TECHNISCHEN PISTENBESCHNEIUNG UND POTENTIALE FÜR ENERGIEOPTIMIERUNGEN

## Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

**Thomas Lang, K.M. Marketing AG** (bis 31.12.2008)

Stadthausstrasse 41, 8400 Winterthur

**Thomas Lang, Basler & Hofmann** (ab 1.1.2009)

Forchstrasse 395, 8032 Zürich, [thomas.lang@bhz.ch](mailto:thomas.lang@bhz.ch), [www.bhz.ch](http://www.bhz.ch)



Technische Beschneigung mit einer Propeller-Maschine.

## **Impressum**

Datum: 5. Mai 2009  
(ersetzt den Schlussbericht Bedarfsabklärung BO-Beschneigungsanlagen vom 19.12.08)

### **Im Auftrag des Bundesamt für Energie**

Bereich Prozess- und Betriebsoptimierung Industrie und Dienstleistungen  
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen  
Postadresse: CH-3003 Bern  
Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

BFE-Bereichsleiter: [martin.stettler@bfe.admin.ch](mailto:martin.stettler@bfe.admin.ch)

Projektnummer: 102 594

Download der Publikation:

- [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch) unter EnergieSchweiz – Unternehmen
- [www.seilbahnen.org](http://www.seilbahnen.org) unter Publikationen - Wirtschaft

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

## Zusammenfassung

Der Energieverbrauch der technischen Beschneiungsanlagen in der Schweiz beträgt rund 60 GWh/a und verursacht jährlich Kosten von 7 bis 10 Millionen Franken. Dabei wird der Energieverbrauch massgeblich durch den Energieaufwand für den Wassertransport (oft vom Tal ins Skigebiet) und demjenigen des "Gefrier-Prozesses" (Schneeerzeugers) bestimmt. Die Abklärungen zeigen, dass bei den meisten Anlagen die Verfügbarkeit und ökologischen Auswirkungen des Wassers das grössere Problem darstellen dürfte als diejenigen der Energie.

### **Energieverbrauch jeweils im Gesamtkontext betrachten**

Der Energieverbrauch verschiedener Wellness- und Sport-Angebote zeigt, dass das Einschneien eines grossen Skigebietes mit rund 550'000 kWh Strom in der Grössenordnung des Betriebs einer offenen Kunst-eisbahn in Zürich (rund 800'000 kWh/a) oder eines Hallenbades in den Bergen (820'000 kWh/a) liegt.

### **Effizientpotential wäre vorhanden**

Technische Beschneiungsanlagen bergen gemäss den Experten ein Energieeffizienzpotential, das durch eine Betriebsoptimierung erschlossen werden könnte. Aus Erfahrungen von anderen Betriebsoptimierungs-Projekten kann man von einem Potential von 10 bis 15% ausgehen. Bei einem jährlichen Energieverbrauch der technischen Beschneigung von 60 GWh beträgt das Effizienz-Potential durch Betriebsoptimierung rund 6 bis 10 GWh/a oder zwischen 0.8 bis 1.6 Mio. CHF pro Jahr.

### **Zusätzliche Investitionen in die Energie-Optimierung der Anlage rechnen sich selten**

Technische Beschneiungsanlagen sind pro Jahr 200 bis 500 Stunden im Betrieb. Deshalb zahlen sich Investitionen in reine Energieoptimierung-Massnahmen oft nicht aus.

### **Energie in die Aus- und Weiterbildung für Schneimeister aufnehmen**

Es besteht ein Bedarf nach einem einfachen, praxisbezogenen Werkzeug mit Tipps für den Schneimeister. Dieses soll in die von Seilbahnen Schweiz und dem VTK im Herbst 2009 erstmals durchgeführte 3 tägige Ausbildung für Schneimeister integriert werden. So wird es möglich, dass die Botschaften von den beiden Verbänden mitgetragen und nachhaltig verbreitet werden.

### **Effiziente Schneeerzeuger kennzeichnen**

Dank einem einheitlichen Messverfahren könnte die Effizienz (Schneemenge, Energieverbrauch...) der Schneeerzeuger bei verschiedenen Betriebsbedingungen durch ein unabhängiges Institut ausgemessen werden. Das Messverfahren soll auf den Arbeiten von Michael Manhart (Lech) [10] oder anderen internationalen Messverfahren aufbauen resp. diese - sofern sinnvoll - übernehmen. Die Bergbahnen erhalten so einen neutralen Überblick über die Effizienz der angebotenen Schneeerzeuger und müssen vor einer Neuanschaffung nicht alle Systeme von Grund auf analysieren. Eine allfällige Entwicklung eines geeigneten Prüfverfahrens und die Einrichtung einer Prüfstelle müsste aus Kostengründen jedoch in Kooperation mit den anderen Alpenländern angegangen werden.

### **Fokus Bestellerkompetenz bei Neuanlagen und Anlagenersatz erhöhen**

Neben der Betriebsoptimierung bestehender Anlagen, soll der Fokus auf die Neuanlagen und den Ersatz von bestehenden Anlagen gerichtet werden. Bei Neuanlagen und beim Ersatz von bestehenden Anlagen besteht ein grösserer Handlungsspielraum, da hier Investitionen getätigt werden. Gemeinsam mit den wichtigsten Akteuren sollen die kritischen Punkte bei der Planung zusammengestellt werden (Wo können „Energielecks“ entstehen?) und daraus entsprechende Empfehlungen für die Besteller (Bergbahnen) aufgearbeitet werden.

Zürich, 5. Mai 2009, Thomas Lang

## Inhalt

|  |    |
|--|----|
| 1. Ziel .....  | 3  |
| 2. Aufgabe.....  | 3  |
| 3. Ausgangslage .....  | 3  |
| 4. Systeme technische Beschneigung.....                                | 5  |
| 5. Anlagen .....   | 7  |
| 6. Energieverbrauch und -Effizienz.....                                | 8  |
| 7. Wasser/Wasserbezug.....   | 10 |
| 8. Akteure technische Beschneigung .....                               | 12 |
| 9. Kosten .....  | 15 |
| 10. Möglichkeiten den Energie- und Wasserverbrauch zu optimieren ..... | 16 |
| 11. Aus- und Weiterbildungsangebote.....                               | 19 |
| 12. Bedarf an Werkzeugen .....   | 19 |
| 13. Laufende Studien und Arbeiten .....                                | 20 |
| 14. Schlussfolgerungen .....   | 21 |
| Anhang   |    |
| A1 Quellen, Literatur .....  | 23 |
| A2 Abschätzung Energieverbrauch .....                                  | 24 |
| A3 Theorie der Schneeproduktion .....                                  | 25 |
| A4 Diverses.....   | 29 |
| A5 Muster Prüfbericht Manhart.....                                     | 30 |

## Herzlichen Dank an

|                 |   |
|-----------------|---|
| Anna Amacher    | Seilbahnen Schweiz, Bern                        |
| Claus Dangel    | Bächler Top Track, Auw                          |
| Mathieu Fauve   | Schnee und Lawinenforschungsinstitut SLF, Davos |
| Franz Käch      | Brigger + Käch, Reussbühl                       |
| Gerhard Marti   | Bergbahnen Savognin, Savognin                   |
| Bernhard Pittet | Atlas Copco, Studen/Biel                        |
| Fluvio Sartori  | Seilbahnen Schweiz, Bern                        |
| Armin Tanner    | Amt für Energie und Verkehr, Chur               |
| Teias Wasescha  | Bergbahnen Savognin, Savognin                   |

## 1. Ziel

Das Ziel des vorliegenden Projekts ist, die energetische Bedeutung der technischen Pistenbeschneigung in der Schweiz zu quantifizieren und aufzuzeigen, ob und wie die Energieeffizienz der Anlagen verbessert werden kann.

## 2. Aufgabe

Mit der Bedarfsabklärung BO-Beschneigungsanlagen soll analysiert werden,

- ob es bei den bestehenden Beschneigungsanlagen Möglichkeiten gibt, den Energie- und Wasserverbrauch mit wirtschaftlich tragbaren Massnahmen zu optimieren
- in welcher Grössenordnung die Einsparungen solcher Optimierungsmöglichkeiten liegen
- was die wichtigsten Optimierungsmassnahmen sind
- ob ein Interesse besteht, gemeinsam ein Instrument/Leitfaden zu entwickeln, das die Betreiber bei der Optimierung des Energie- und Wasserverbrauchs ihrer Beschneigungslage unterstützt.

## 3. Ausgangslage

Die technische Pistenbeschneigung ist für Bergbahnunternehmen und Wintertourismusregionen der Alpenländer überlebenswichtig geworden. Laufend werden neue, höher gelegene Skigebiete erschlossen und mit Beschneigungsanlagen ausgerüstet, um damit der steigenden Schneegrenze zu begegnen.

Von den heute 85% schneesicheren Skigebieten werden somit 2050 noch etwa 63% schneesicher sein. In den Alpenländern (F, I A, CH, D) werden bereits heute durchschnittlich 50% der Pisten technisch beschneit.

Die Schweiz ist mit ihrem Angebot von rund 8'000 km präparierter Pisten an der Spitze der Alpenländer. Davon sind heute 33% technisch beschneibar. Die Investitionszahlen der Bergbahnunternehmen zeigen, dass die Schweiz am Nachrüsten ist, denn ca. 3/4 der Investitionen werden für neue Beschneigungsanlagen getätigt.

Ein Kilometer Beschneigungsanlage kostet 700'000 bis 1'000'000 Franken und verursacht 20'000 bis 100'000 Franken Betriebskosten pro Jahr.

Es gibt weder in der EU noch in der Schweiz Standards für Energie- und Wassereffizienz. Vorschriften gibt es nur für Lärmemissionen und es existiert in den meisten Kantonen eine UVP-Pflicht bei Anlagen grösser 5 ha. Es ist nicht klar, wie effizient heutige und ältere Anlagen mit Strom und Wasser umgehen.

## 4. Systeme technische Beschneigung

Die Entwicklung der technischen Beschneigung begann in den 50er Jahren in den USA. Die ersten technischen Schneeerzeuger waren sogenannte Druckluft- oder bodennahe Hochdrucksysteme<sup>1</sup>. 1978 wurde in Savognin in der Schweiz die erste grosse Beschneigungsanlage Europas errichtet. Bei der Inbetriebnahme 1978 wurden 10 bodennahe Hochdruckkanonen installiert, die alle 40-50 m auf Schlitten montiert wurden und so verschiebbar waren. Die Pumpenleistung betrug 900 kW und die Kompressorleistung für die 10 Kanonen 1'000 kW (5 x 200 kW). Im ersten Jahr wurde mit einem Wasser/Luft Verhältnis von 1:120 gearbeitet und in den folgenden Jahren konnte dank Erfahrung das Verhältnis auf 1:80 optimiert werden. Mit der Modifikation der Düsen (Arlbergdüse) sank das Verhältnis auf 1:60.[2]

### 4.1 Vereinfachtes Übersichtsschema einer technischen Beschneigungsanlage

Eine technische Beschneigungsanlage besteht aus einer Wasserfassung evtl. mit See, einer Zentrale mit Wasserpumpen, einer Steuerung und je nach System Druckluftkompressoren, Verteilungen für das Wasser, Steuerleitungen und je nach System Druckluftleitungen oder Elektroleitungen und dem eigentlichen technischen Beschneigungssystem.

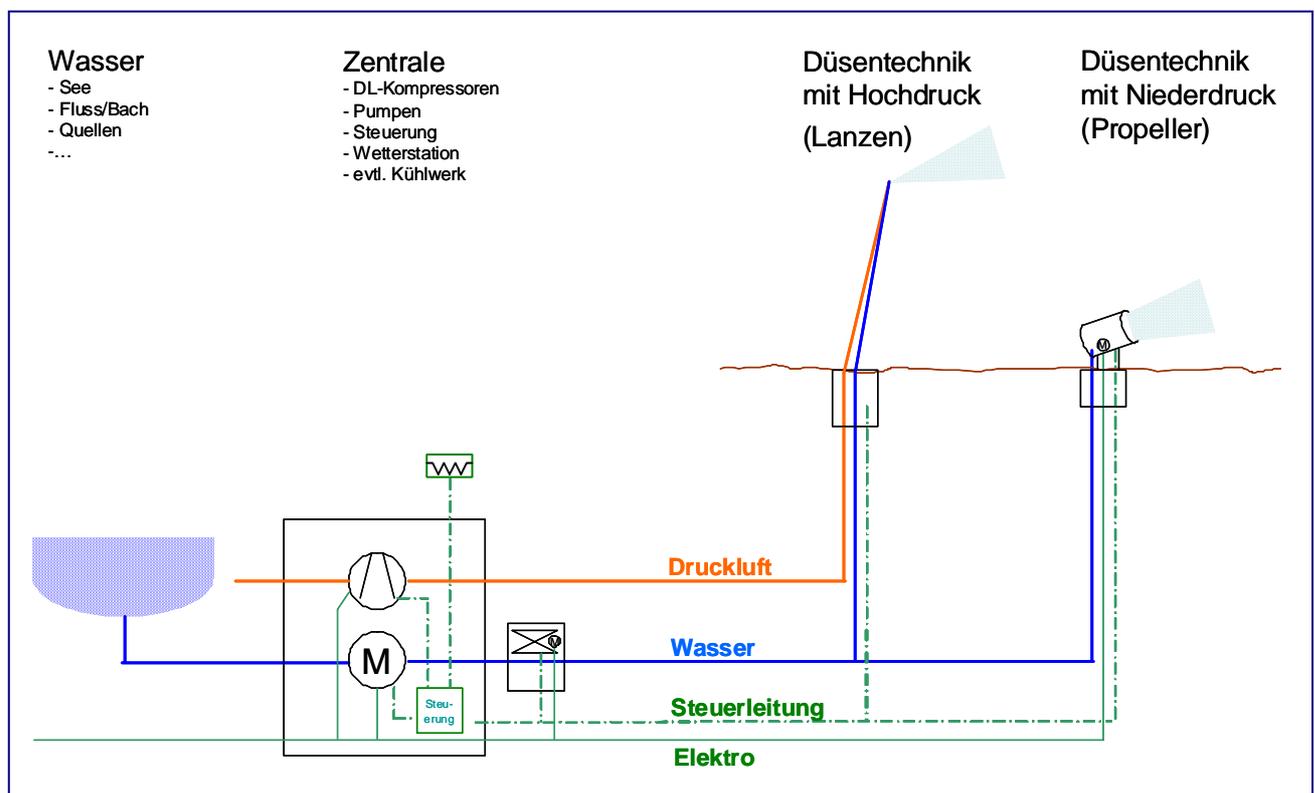


Abb1: Vereinfachtes Übersichtsschema einer technischen Beschneigungsanlage.

<sup>1</sup> Die Bezeichnung Hochdrucksystem ist technisch eigentlich nicht zutreffend, hat sich aber im Sprachgebrauch so eingebürgert.

#### 4.1 Düsentechnik mit Niederdruck (Propellersystem, Niederdrucksystem)

Bei Propellersystemen bläst ein Ventilator Umgebungsluft durch ein grosses Rohr. Am Austritt des Rohres wird, durch mehrere feine Düsen Wasser und in geringen Mengen auch Druckluft (Nukleatoren) in den Luftstrom gesprüht. Das Wasser wird 20 bis 45 Meter weit ausgeworfen und gefriert dabei. Die Druckluft für die Nukleatoren<sup>2</sup> wird von einem kleinen Kompressor direkt am Gerät erzeugt.

Für dieses System sind neben den Wasserleitungen auch relativ grosse Stromkabel zu verlegen, welche die erforderliche Leistung übertragen können.

Propellersysteme produzieren bei idealen Bedingungen rund 100 m<sup>3</sup>/h. Der Energieverbrauch von Propellersystemen ist bei allen Temperaturen gleich hoch. Im Grenzbereich wird eine erste Stufe zugeschaltet. Da die Energieaufnahme (für den Ventilator, Kompressor...) nicht wesentlich geringer als bei Vollast ist, arbeitet das System in diesem Temperaturbereich weniger effizient. Mit sinkender Temperatur können zusätzliche Stufen zugeschaltet werden und die erzeugte Schneemenge und Effizienz der Anlage steigt. Im Grenzbereich (-4 °C Feuchtkugeltemperatur) produzieren Propellersysteme mehr Schnee als Druckluftsysteme.

Da Propellermaschinen meist zielgerichtet arbeiten muss der Schnee der anschliessend verschoben (verstossen) werden. Dies bedeutet Aufwand und Maschinenstunden für den Schneemeister resp. Pistenfahrzeugfahrer. Propellermaschinen werden fix auf Masten installiert oder mobil (z.B. auf Schlitten) angebracht, damit sie mit dem Pistenfahrzeug verschoben werden können. [2]



Abb. 1 bis 3: Niederdrucksystem fix auf Masten und auf mobil auf Schlitten montiert

#### 4.2 Düsentechnik mit Hochdruck (Lanzen, Druckluftsysteme, Hochdrucksysteme)

Beim Druckluftsystem wird im Bereich der Düse Wasser mit entspannter Druckluft vermischt. Die ursprünglichen Druckluftsysteme – so wie sie beispielsweise in Savognin eingeführt wurden - arbeiteten bodennah. Die bodennahen Hochdrucksysteme waren ineffizient, da sie einen hohen Druckluftbedarf hatten und wurden weitgehend durch effizientere Systeme ersetzt. In der Schweiz dürften nur noch vereinzelte bodennahe Hochdruckkanonen installiert sein.

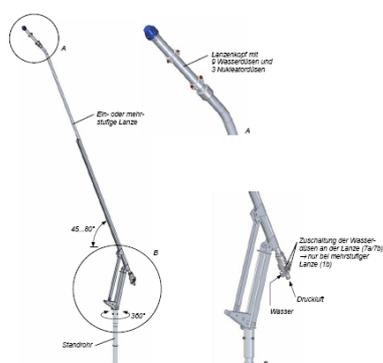


Abb 4: Detail Nessy



Abb 5 und 6: Lanzen im Betrieb

<sup>2</sup> Nukleatoren beschleunigen die Umwandlung des Wassers in Eis.

Seit 1990 finden vermehrt Druckluftsysteme auf Lanzen oder Masten Verbreitung. Die Lanzen machen sich die Fallhöhe des versprühten Wassers und damit die längere Flugzeit zur Ausbildung von Schnee zunutze. Die Systeme mit Lanzen oder Masten benötigen wesentlich weniger Druckluft. Voraussetzung für die Verwendung des Druckluftsystems ist die Installation von Wasserleitungen, Druckluftrohren und Kompressoren, sowie von Steuerkabeln bei Automatisierung. Eine Lanze produziert bei idealen Bedingungen 50 bis 70 m<sup>3</sup> Schnee pro Stunde und können ab einer Feuchtkugeltemperatur<sup>3</sup> von – 2°C eingesetzt werden.

Lanzen werden für Flächenbeschneidung eingesetzt. Sie haben den Vorteil, dass der Schnee nicht transportiert werden muss und dieser schneller verarbeitet werden kann. Dazu wird rund alle 30 Meter eine Lanze installiert. Die besten Lanzen weisen mit rund 60 dbA relativ geringe Lärmemissionen auf. Ein Nachteil ist, dass durch die hohe Fallhöhe bei starkem Wind der Schnee weggeblasen wird. Will man nicht neben der Piste Schneien muss die Anlage bei Windgeschwindigkeiten von rund 5 m/s quer zur Piste abgestellt werden. [2]

### 4.3 Weitere Systeme

#### 4.3.1 Kryo-Kanone

Bei Kryo-Kanonen wird Wasser und Druckluft mit einem Kühlmittel (flüssiger Stickstoff) vermischt und ausgeblasen. Die Anwendung dieses Systems ist auch bei Temperaturen oberhalb des Gefrierpunktes möglich. Ein flächendeckender Einsatz ist wirtschaftlich jedoch nicht möglich, da die Investitionskosten hoch sind. Für spezielle Anlässe wie zum Beispiel der Freestylesport-Event Freestyle im September auf der Landiwiese in Zürich ist technischer Schnee bei Temperaturen oberhalb des Gefrierpunktes notwendig. [3]

#### 4.3.2 Eiskanone

Eiskanonen frieren Wasser zu Eisblöcken. Diese werden dann zerstoßen und mit Druckluft auf die Piste geblasen. Eiskanonen sind ein einfaches Prinzip, das unabhängig von der Aussentemperatur funktioniert. Allerdings besteht der „Schnee“ hier aus Eissplittern, nicht aus Schneeflocken und eignet sich nur schlecht zum Skifahren und wird nur für kleine Flächen verwendet. Dieses Verfahren wird in der Schweiz kaum verwendet. [3]

#### 4.3.3 Vacuum Ice Machine

Das System stammt aus dem Bergbau, wo es für die Kühlung von Goldminen benützt wird. Es funktioniert vereinfacht gesagt wie ein Tiefkühler – die Temperatur der Umgebungsluft ist nicht relevant. In einem geschlossenen Behälter (Durchmesser 3.2m, Höhe 10m) wird Wasser ohne Zusatz einem Vakuum ausgesetzt. Ein kleiner Teil verdampft, das restliche Wasser gefriert zu Schnee, welcher anschliessend ausgestossen wird; zirka 40 m<sup>3</sup> pro Stunde. Der so produzierte Schnee soll in der Konsistenz einem Frühlings – Sulzschnee entsprechen. Die neue Schneemaschine kostet rund CHF 2 Mio. Sie wird in einem Anbau der Pistenfahrzeug Garage auf dem trockenen Steg installiert.

Die Energieeffizienz des Systems wird unterschiedlich beurteilt. Der Hersteller verspricht einen "*niedrigem Stromverbrauch, der dem Jahresenergiebedarf eines Haushaltes entspricht.*" [4] Experten schätzen den Stromverbrauch für die Produktion von 40 m<sup>3</sup> Schnee auf 75 kW, was diese eher als hoch taxieren.

---

<sup>3</sup> Der Wert der Feuchtkugeltemperatur ist von der absoluten Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig, welche massgeblich die Schneebildung beeinflussen. Eine detaillierte Beschreibung der Feuchtkugeltemperatur befindet sich im Anhang A3.

#### 4.4 Kriterien Beschaffung

Die Bergbahnen wollen eine gute Schneequalität. Darum steht bei der Beschaffung von technischen Beschneigungsanlagen die Schneequalität als Auswahlkriterium im Vordergrund. Zudem haben Systeme, die bei möglichst hohen Aussentemperaturen (Grenztemperatur) Schnee in genügend grosser Menge produzieren können („sollten Schneemengen liefern und nicht nur Reifen produzieren“) einen entscheidenden Marktvorteil. Weiter gibt es (persönliche) Vorlieben und gute Erfahrungen aus der Vergangenheit für die Düsenteknik mit Hochdruck oder die Düsenteknik mit Niederdruck, welche die Systemwahl beeinflussen. Die Energieeffizienz der Systeme ist bei der Wahl kein entscheidendes Kriterium, kann aber bei gleichwertigen Angeboten entscheidend werden.

### 5. Anlagen

#### 5.1 Anlagenbestand

In der Schweiz werden rund 150 Skigebiete technisch beschneit. Die technische Beschneigung auf Schweizer Skipisten ist weiterhin zunehmend. Von den rund 220 km<sup>2</sup> können 2007/08 rund 72.6 km<sup>2</sup> resp. 7'260 ha technisch beschneit werden. Dies entspricht rund 33% der Pistenfläche (Vergleich Österreich > 50%, Südtirol bis 80%). Die Beschneigung garantiert den Wintersportgebieten eine ausreichende Schneedecke. [5]

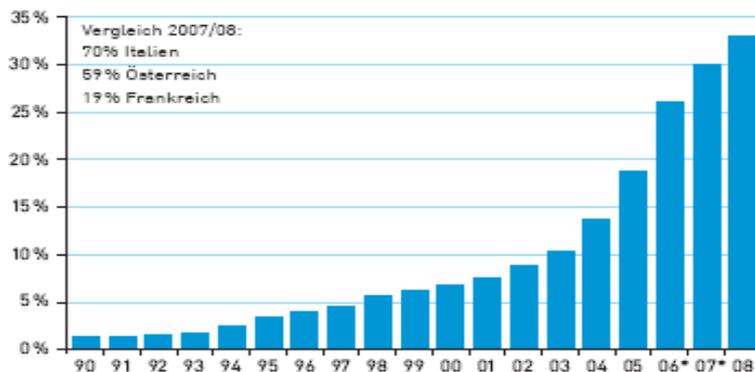


Abb 2: Der Anteil der beschneiten Pisten am Total der präparierten Pistenfläche in der Schweiz beträgt 2007/2008 rund 33% oder 7'260 ha.

Speziell die Propellersysteme werden mit dem Pistenfahrzeug im Skigebiet verschoben. Dies macht es schwer, aufgrund der technisch den Anlagenbestand (Anzahl Kanonen) genau zu beziffern. 2004/2005 wurden nach groben Schätzungen in der Schweiz rund 400 Systeme mit Lanzen und rund 900 Systeme mit Propeller installiert (Marktaufteilung: Lanzen 30 % bis 50 %, Propeller 50 % bis 70 %). Viele Skigebiete setzen sowohl Lanzen wie auch Propellermaschinen ein (Mix-Systeme).

#### 5.2 Betrieb der technischen Beschneigungsanlagen

Beschneigungsanlagen sind in der Schweiz typischerweise zwischen 250 bis 400 Stunden im Jahr im Betrieb. Die Experten rechnen mit durchschnittlich 300 Betriebsstunden pro Jahr.

### 5.2.1 Phase Einschneien

Das Weihnachtsgeschäft (bis Neujahr) kann rund 1/3 des gesamten Wintergeschäftes der Bergbahnen ausmachen, darum sollte vor Weihnachten genügend Schnee liegen. Die Bergbahnen beginnen darum mit dem Einschneien so früh als möglich. In der Regel dürfen diese ab dem ab. 1. November technisch schneien, sofern der Boden gefroren ist. Dann wird oft wähen 10 bis 14 Stunden pro Tag Schnee erzeugt. Wenn genügend Wasser zur Verfügung steht und es kalt genug ist, kann auch rund um die Uhr geschneit werden. Das Ziel ist, Mitte Dezember eine gute Unterlage zu haben.

Das Einschneien im November /Dezember erfolgt in einer Zeit, in der der Strombedarf im Tal gering ist. Die gesamten Tourismusbetriebe (Bergbahnen, Hotels...) haben noch keine Saison.

Der Technische Leiter steht in dieser Zeitz stark unter Druck, weil vor Weihnachten Schnee gefordert wird. Der Druck kann von der Geschäftsleitung der Bergbahnen, aber auch durch die Bevölkerung und die Touristen ausgehen.

### 5.2.2 Phase Nachschneien

Im Februar/März wird bei Bedarf etwas nachgeschneit. Dabei ist oft die Verfügbarkeit von Wasser (z.B. Füllgrad des Speichersees) massgebend, ob und wie stark nachgeschneit werden kann. (siehe Abbildung Seite 10)

## 5.3 Bergbahnen

Die durchschnittliche Länge von Beförderungs-Anlagen (Sessel- Gondelbahnen, Skilifte) beträgt rund 1'700 Meter. Demzufolge ist eine durchschnittliche Piste rund 2 – 2.5 km Lang (gilt auch für technisch beschneite Pisten) Die Beförderungs-Anlagen werden effizienter und die Belastung der Pisten wird dadurch massiv erhöht. 8er Gondeln befördern bis 3'000, Sesselbahnen bis 2'800 und Skilifte max. 1'200 Personen pro Stunde.

Gondelbahnen haben eine elektrische Leistung von 500 – 700 kW und sind während der Wintersaison rund 110 Tage resp. 900 bis 1'200 Stunden im Betrieb. [18]

## 6. Energieverbrauch und -Effizienz

### 6.1 Energieverbrauch

Detaillierte Untersuchungen zum Energieverbrauch von technischen Beschneiungsanlagen der Schweiz liegen den Experten, wie auch dem Verband Seilbahnen Schweiz nicht vor. Der Energie- und Wasserverbrauch der Schneesportgebiete variiert stark und ist abhängig von der Effizienz der Erzeugungsanlage, der Technologie, dem Alter, der Kapazität der Anlage und der lokalen Aussentemperaturen. Aufgrund der Experteninterviews und der Literaturstudie wurde der Energieverbrauch anhand eines Bottom-Up- und eines Top-Down Ansatzes geschätzt.

#### 6.1.1 Energieverbrauch Bottom-UP abgeschätzt

Basierend auf der geschätzten Anzahl installierter Kompressoren (resp. der Kompressorenleistung) einer groben Abschätzung der Pumpenleistung und Erfahrungswerten für die jährliche Betriebszeiten kann ein Energieverbrauch von rund 64 GWh/a bestimmt werden.

### 6.1.2 Energieverbrauch Top-Down abgeschätzt

Basierend auf drei Anlagen, von denen die beschneite Fläche und der Energieverbrauch für die technische Beschneigung bekannt ist, wurde ein spezifischer Wert berechnet und für die Schweiz aufgerechnet. Ergebnis: Energieverbrauch rund 58 GWh/a

### 6.1.3 Geschätzter Energieverbrauch und geschätzte Energiekosten

Der Energieverbrauch der technischen Beschneigung in der Schweiz dürfte gemäss der groben Abschätzungen im Bereich von 60 GWh/Jahr liegen. Dies entspricht rund 0.1% des Schweizer Stromverbrauchs.

| Methode                 | Energieverbrauch technische Beschneigung CH |
|-------------------------|---|
| 1. Bottom-UP            | 64 GWh/a                                    |
| 2. Top-Down             | 58 GWh/a                                    |
| gerundeter „Mittelwert“ | 60 GWh/a                                    |

Tabelle 1: Ergebnisse der Energieverbrauchsabschätzung mit unterschiedlichen Methoden.

Die Energiekosten für die technische Beschneigung in der Schweiz liegen im Bereich zwischen 7 und 10 Millionen Franken pro Jahr.

## 6.2 Wofür wird bei der technischen Beschneigung die Energie gebraucht?

Der Energieverbrauch der Beschneigungsanlagen wird massgeblich von zwei Faktoren beeinflusst.

### 6.2.1 Aufwand für den Wassertransport

Ein zentraler Einflussfaktor ist, wie hoch resp. wie weit das Wasser gepumpt werden muss. Wird in einem Skigebiet das Wasser vom Tal für die technische Beschneigung von zwei Lift-Sektionen heraufgepumpt, sind Pumpenleistungen bis gegen 900 kW notwendig. Wird das Wasser hoch im Skigebiet in einem Speichersee gefasst, kann die Pumpenleistung erheblich reduziert werden.

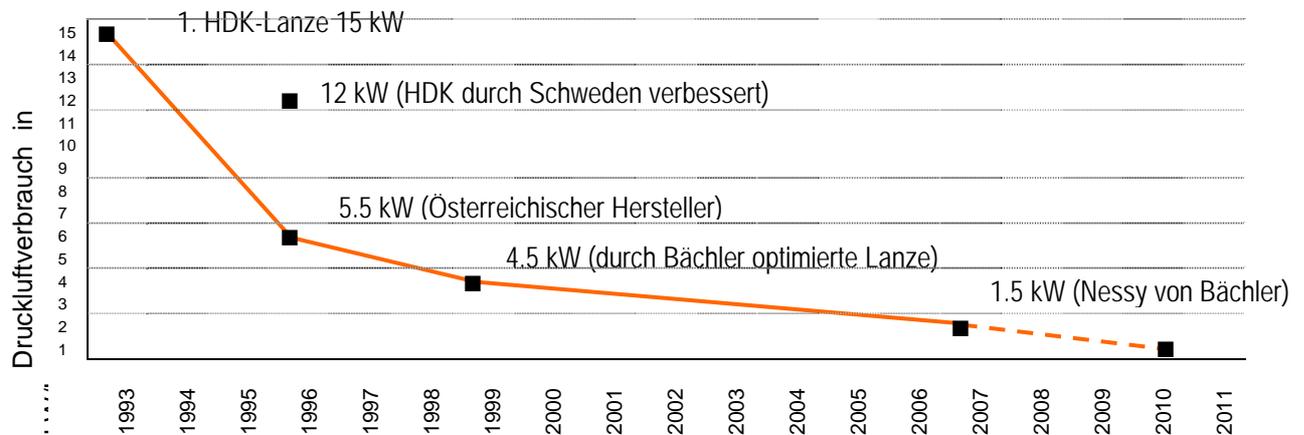
### 6.2.2 Aufwand für den „Gefrier-Prozess“

Die Umwandlung von Wasser in Schnee erfolgt bei Hochdrucksystemen indem das Wasser mit Druckluft gemischt und geimpft wird. Für die Erzeugung der Druckluft wird Energie benötigt. Die Kompressoren können zentral (an einem Ort) oder dezentral (auf jeder Lanze) angeordnet werden. Je nach Lanzentyp wird unterschiedlich viel Druckluft benötigt.

Bei Niederdrucksystemen wird das Wasser mit Düsen zerstäubt, geimpft und mit einem Ventilator ausgeworfen. Der Ventilator benötigt je nach Grösse 5.5 bis 18.7 kW. Für die Zerstäubung ist ein Kompressor mit einer Leistung von 4 kW, bis 7.5 kW direkt auf dem Schneeerzeuger installiert. Die Düsenkranzheizung benötigt rund 1.4 kW und die Wasserverteiler und Ventile nochmals rund 0.25 kW.

### 6.2.3 Energieeffizienz

In den letzten 18 Jahren hat sich der spezifische Druckluftverbrauch pro Lanze um den Faktor 10 reduziert (siehe Grafik 1).



Grafik 1: Entwicklung Druckluftverbrauch in kWh pro Lanze.

Diese Entwicklung zeigt die positive Tendenz beim Energiebedarf für die Druckluft der Lanzen. Eine genauere aber auch komplexere Aussage zur Energieeffizienz der Anlagen würde der Energieverbrauch für die erzeugte Schneemenge bei den verschiedenen Temperaturen darstellen (kWh/m<sup>3</sup> Schnee bei unterschiedlichen Aussentemperaturen<sup>4</sup>).

### 6.3 Energie im Gesamtkontext betrachten

In der Diskussion mit den Fachleuten wurden immer wieder eingewandt, dass die Energiefrage im Gesamtkontext betrachtet werden muss. So mache es aus regionalpolitischer und ökologischer Sicht Sinn, "wenn man in unmittelbarer Nähe die Skiferien verbringt, statt hunderte Kilometer mit dem Flugzeug oder dem Auto ins Ausland zu fahren".

Auch soll der Energieverbrauch mit den anderen Sportangeboten verglichen werden [19]:

|                                     |             |
|-------------------------------------|-------------|
| Mittelgrosses Skigebiet einschneien | 325'000 kWh |
| Grosses Skigebiet einschneien       | 550'000 kWh |
| Kunsteisbahn Zürich, offen          | 800'000 kWh |
| Hallenbad in den Bergen             | 820'000 kWh |

## 7. Wasser/Wasserbezug

Der Seilbahnverband Schweiz (SBS) hat zusammen mit dem BAFU und dem SVGW grobe Abschätzungen zum Wasserbedarf gemacht. Gemäss dieser Abschätzung werden total rund 18 Mio. m<sup>3</sup> Wasser oder 255'000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> für die technische Beschneieung eingesetzt. Für eine 30 cm dicke Schneedecke mit technischem Schnee benötigt man für eine durchschnittliche Piste von 2 – 2.5 km Länge rund 7'500 bis 12'500 m<sup>3</sup> Wasser<sup>5</sup>.

<sup>4</sup> resp. der Feuchtkugeltemperatur

<sup>5</sup> Die grosse Spannweite wird mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen (Mikroklima) begründet. Eine genaue Klärung der Ursache war nicht möglich.

## 7.1 Wassernutzung

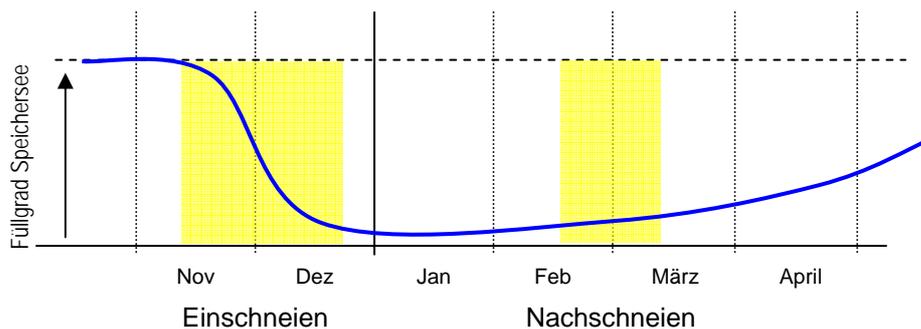
Selten verfügen die Bergbahnen über genügend eigenes Wasser. Um „fremdes“ Wasser zu nutzen benötigen sie eine Berechtigung von der Konzessionsinhaberin (Gemeinde, Grundeigentümer oder Quellbesitzer). Ist Wasser durch eine Konzession bereits anders genutzt (Energiegewinnung) ist eine Anpassung der Konzession erforderlich. Dies setzt jedoch voraus, dass der Konzessionsnehmer einverstanden ist.

Je nach Region können die Konditionen für die Wassernetzung sehr unterschiedlich sein (kostenlos bis spürbarer  $m^3$ -Preis).

## 7.2 Speicherseen

Das Wasser wird zunehmend aus künstlichen Speicherseen entnommen. Je grösser der Speichersee, desto besser (und teurer). Die Speicherseen werden übers Jahr kontinuierlich gefüllt. Anlagen die über einen hoch gelegenen Speichersee verfügen, der sich natürlich füllt, benötigen weniger Energie für die Wasserpumpen. Speicherseen werden jedoch teilweise mit Wasser aus tieferen Regionen gefüllt. Dazu werden Pumpen eingesetzt (z.B. 2/3 natürlicher Zufluss, 1/3 Wasser gepumpt). Ein Speichersee bedeutet somit nicht zwingend, dass keine Energie für die Pumpen benötigt wird.

Zwischen Nov./Dez. wird in der Regel das in den Speichern gesammelte Wasser vollständig genutzt. Zuflüsse nach dem Start mit der Beschneigung sind erwünscht. Bei Speicherseen mit der Möglichkeit

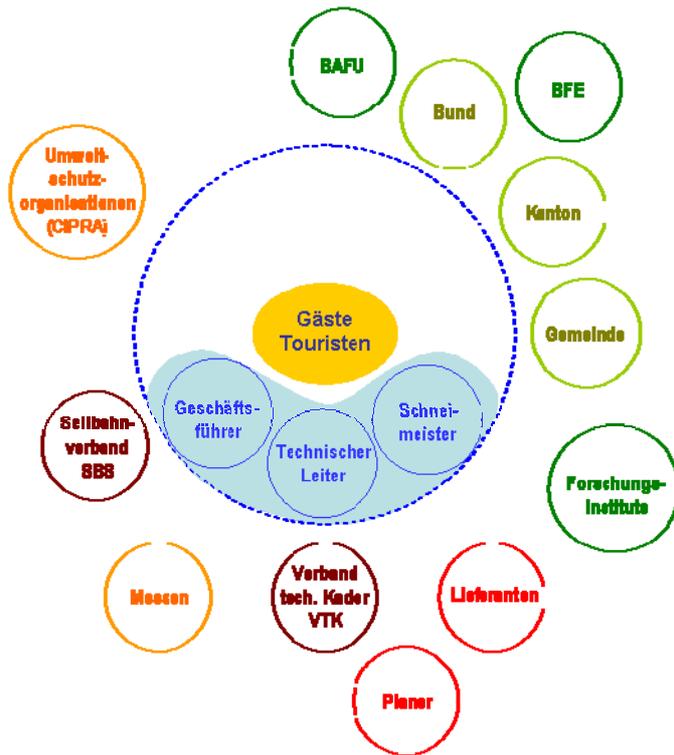


Grafik: Beispiel für die Dynamik des Füllgrads eines Speichersees über den Winter.

der Nachfüllung (Pumpen, Zuläufe, in der Regel Überläufe aus Reservoirs, etc.) kann nach dem Einschneien nachgeschneit werden. Mitte Januar bis gegen Ende Februar erfolgt in der Regel nur noch ein lokales Nachschneien. [18]

Gemäss den Experten dürfte bei den meisten Anlagen das Wasser (Verfügbarkeit & ökologische Auswirkungen) das grössere Problem sein als der Energieverbrauch. [18]

## 8. Akteure technische Beschneigung



Grafik: Akteure Technische Beschneigung.

### 8.1 Bergbahnen

#### 8.1.1 Schneimeister

Der Schneimeister ist für die technische Beschneigung verantwortlich. Seine Aufgabe ist, guten Schnee zu machen. Oft sind es Fachleute mit einer handwerklichen Ausbildung (Handwerk, Landwirtschaft, LKW-Fahrer). Sie werden vom Hersteller geschult und sammeln ihre Erfahrungen „on job“. Grössere Beschneigungs-Anlagen sind stark automatisiert und funktionieren automatisch. Die Arbeit des Schneimeisters verändert sich dadurch vom manuellen/handwerklichen vermehrt zu Controlling-Aufgaben. Während der Saison stellen die Schneimeister die Parameter der Anlagensteuerung ein. Bei der Planung oder dem Anlagensatz ist der Schneimeister der Ansprechpartner für den Planer/Lieferant, wenn technische Fragen und Anlage Spezifikationen geklärt werden müssen.

#### 8.1.2 Pistenfahrzeugfahrer

Der Pistenfahrzeugfahrer hat indirekt einen Einfluss auf die technische Beschneigung. Seine Aufgabe ist, eine hohe Pistenqualität zu erreichen. Da die Verarbeitung von technischem Schnee Kenntnisse bezüglich Ruhezeiten, Zeit Sinterungsprozess, Umgang mit feuchtem Schnee usw. erfordert, muss der Pistenfahrzeugfahrer entsprechend geschult werden.

#### 8.1.3 Geschäftsführer

Mit dem Schneimeister werden bei der Anlagenplanung die finanziellen Fragen besprochen und geklärt.

#### 8.1.4 Verwaltungsrat

In der Regel entscheidet der Verwaltungsrat über die Strategie und die (grossen) Investitionen in die technischen Beschneigungsanlagen.

## 8.2 Gäste (Touristen, Skisportler...)

Unter den Gästen können verschiedene Gruppen unterschieden werden (Erstbesucher, Stammgäste, Ferienhausbesitzer...). Die Schneesicherheit ist bei einer grossen Anzahl der Gäste ein zentrales Auswahlkriterium des Wintersportortes. Die Kunden sind heute anspruchsvoll. Bereits anfangs November muss mit dem beschneien der Pisten begonnen werden, damit die Kunden beim Saisonstart (Ende November / Mitte Dezember) gute Schneeverhältnisse antreffen.[7]

## 8.2 Planung und Ausführung

Beschneigungsanlagen werden von Bauingenieuren unter Einbezug von Spezialisten (z.B. Pumpen, Kompressoren,...) durchgeführt. In der Schweiz gibt es fünf unabhängige Planer von Beschneigungsanlagen und Lieferanten, welche die Planung anbieten. Es gibt zwei verschiedene Planungsprozesse.

- Fach-Planung durch Spezialisten; Ausschreibung, Vergabe, Ausführung.
- Gesamtausführung durch GU (in der Regel Systemlieferanten).

### 8.2.1 Fachplanung

Bei der Fachplanung wird die gesamte Anlage Komponenten unabhängig geplant. Der Planer schreibt einzelne Elemente aus (Lanzen/Schacht, Luftleitungen, Steuerung, Kompressoren, Pumpen, Speichersee...). Es kann auch eine Kombination zwischen unabhängigem Planer und Lieferant gewählt werden. Der bauliche Teil wird durch den Bauingenieur und das Schneisystem durch den Lieferanten (meist als Schneisystem-GU) geplant.

### 8.2.2 Gesamtausführung durch GU

Die ganze Anlage wird durch den Lieferanten als GU geplant und auch ausgeführt. Die meisten grossen Lieferanten von technischen Beschneigungssystemen bieten die Gesamtausführung als GU an.

Es gibt keine Fachgruppen (z.B. SIA-Fachgruppe) die sich mit der Planung von Beschneigungsanlagen befassen. Für die Planung sind die anerkannten Standesregeln (SIA Leitungsbau, Grabarbeiten, Abwasserfachleute, Suisstec...) einzuhalten.

## 8.3 Hersteller/Lieferanten

In der Schweiz bieten rund 10 Lieferanten Beschneigungssysteme als GU an (York, SMI, Gemini, Techno Alpin, Lenco, Suffag, Demac...). Drei Anbieter dürften gemäss Expertenschätzungen rund 80% Marktanteil haben.

## 8.4 Verbände & Organisationen

### 6.4.1 Seilbahnen Schweiz

Seilbahnen Schweiz ist der Verband der Schweizer Seilbahnbranche und somit auch der Verband der Unternehmen, welche technische Beschneigungsanlagen betreiben. Zweck von Seilbahnen Schweiz ist es, die gemeinsamen Anliegen und Interessen der Mitglieder zu vertreten und ihre Zusammenarbeit zu fördern. Insgesamt gibt es in der Schweiz etwa 524 Seilbahnunternehmen, die zum Grossteil im Verband Mitglied sind. Seine Aktivitäten als Branchenverband fokussiert sich auf die Vertretung gegenüber Behörden, die Mitgliederberatung bis zur Öffentlichkeitsarbeit. Im Seilbahnverband sind die Geschäftsführer und Verwaltungsräte der Bergbahnen vertreten.

Nebst dem Schweizerischen Seilbahn Verband gibt es noch Kantonale Verbände, wie z.B. Bergbahnen Graubünden.

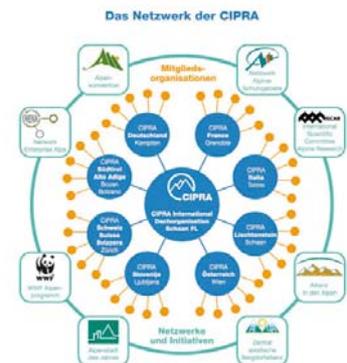
### 8.4.2 Vereinigung Technisches Kader Schweizer Seilbahnen (VTK)

Die VTK ist der Verband des technischen Personals und ist im Bereich der Aus- und Weiterbildung (technische Kurse, Seminare, Besichtigungen..) aktiv. Der Schwerpunkt liegt beim Seilbahnbetrieb, Sicherheit und Pistenrettung. Die Mitglieder des VTK sind mehrheitlich die technischen Leiter und das technische Personal der Bergbahnen. Der VTK gibt 3x pro Jahr die VTK/UCT Information mit einer von Auflage 950 Exemplare heraus. Technische Beschneigung ist ein Randthema für den VTK.

### 8.4.3 Umweltorganisationen

Verschiedene Umweltorganisationen setzen sich für den Schutz der alpinen Natur und Landschaft ein, engagieren sich für eine nachhaltige Wirtschaftsweise in den Alpen und befassen sich mit den Umweltaspekten zu den technischen Beschneigungsanlagen. Die Umweltorganisationen haben sich in der CIPRA zusammengeschlossen. Die Umweltorganisationen hinterfragen die Projekte kritisch und können einen Beitrag leisten, die Projekte zu verbessern.

Heute besteht in der Regel ein gutes Einvernehmen zwischen den Betreibern und den Umweltorganisationen. Bei Projekten ist ein früher Einbezug der Umweltorganisationen unabdingbar. Umweltorganisationen werden im Vorfeld von Umweltverträglichkeitsprüfungen – welche an 5 ha vorgeschrieben sind - mit einbezogen.



## 8.6 Behörden

### 8.6.1 Kantonale Ämter

Speziell beim Neu- und Ausbau von technischen Beschneigungsanlagen sind verschiedenen Kantonale Ämter gesetzgebend und daher mit einbezogen. Je nach Organisation des jeweiligen Kantons sind heissen die Amtsstellen unterschiedlich. Bei folgenden Themen sind werden die Ämter mit einbezogen: Wasserentnahme (z.B. Amt für Wasserwirtschaft), Umweltverträglichkeitsprüfung UVP (z.B. Amt für Umwelt) und Nutzungsplanung (z.B. Amt für Raumentwicklung). Keine Rolle hat in der Regel das Amt für Energie.

Beispiel Kanton Graubünden: Im Kanton Graubünden müssen Beschneigungsanlagen Zonenkonform sein (Richtplanung Regional / Lokal) und werden in einem BAB-Verfahren bearbeitet. Über 5 ha Beschneigungsfläche ist zudem eine Umwelt Verträglichkeitsprüfung (UVP) erforderlich. Man arbeitet nach Richtlinien beim Beschneien (Wegleitung für Beschneigungsanlagen). Darin sind Beginn / Ende der Beschneigung sowie weitere relevante Themen (Ökologie, etc.) abgehandelt.

### 8.6.2 Gemeinden

Die Gemeinden besitzen oft die Wassernutzungsrechte. Will ein Bergbahnbetrieb Wasser für die technische Beschneigung nutzen, muss er dies bei der beim Eigentümer der Wassernutzungsrechte (in der Regel die Gemeinde) beantragen.

Die Gemeinde verlangt in der Regel einen Baubegleiter, der im Auftrag des Bauherren das Projekt begleitet und die Einhaltung der Vorschriften (UVP) kontrolliert.

## 8.6 Hochschulen/Forschungsinstitute

In der Schweiz beschäftigen sich das WSL Davos (Team Industrieprojekte und Schneesport), die HES-SO Sierre, die Uni Lausanne und die FHWN mit Projekten im Bereich der technischen Beschneigung.

## 8.7 Informationsgefässe

### 8.7.1 Messen

Die grösste Fachmesse in Europa ist die Interalp in Innsbruck. In der Schweiz findet die Swissalpine (Martigny), in Frankreich die SAM (Grenoble) und in Italien die Messe in Bozen statt. Der Besuch von Messen ist für die Betreiber sehr wichtig. Sie informieren sich an den Messen über die neusten Produkte und Möglichkeiten bei der technischen Beschneigung.

### 8.7.2 Zeitschriften

Von den Fachleuten (Schneimeister, technische Leiter) werden folgende Fachzeitschriften gelesen:

- Internationale Seilbahn-Rundschau (ISR), Bohmann Druck und Verlag, Wien
- VTK/UCT Information
- Mountain Rider, [www.mountain-rider.ch](http://www.mountain-rider.ch)
- Interne Mitteilungen SBS
- Mountain Manager, Eubuco verlag GmbH, Hochheim
- SI "Seilbahn International", [www.simagazin.at](http://www.simagazin.at)

## 9. Kosten

In der Schweiz wurden bis 2003 rund 500 Millionen Franken in Beschneigungsanlagen investiert (Mathis, Siegrist & Kessler 2003). 2006/2007 wurden 23% der Investitionen der Bergbahnbetriebe für Beschneigungsanlagen ausgegeben. Insgesamt investierten die Bergbahnbetriebe in den Jahren 2006 & 2007 409 Mio. CHF. Dies entspricht Investitionen in die Beschneigungsanlagen von rund 47 Mio. CHF pro Jahr. Die Investitionen wurden für Neubauten und Erneuerungen (Ersatz bestehender Anlagen) eingesetzt. [5, 10]



Investitionen in technische Beschneigungsanlagen werden aus rein ökonomischen Überlegungen ausgelöst.

## 9.1 Investitionskosten Gesamtanlage

Die Investitionskosten für eine Beschneiungsanlage (inkl. Nebenanlagen wie Elektro, Luftkompressoren, etc.) von einer Länge von 1 Kilometer beträgt rund 750'000 bis 1'000'000 Franken und ist stark abhängig von der Bodenbeschaffenheit (Fels/Erde). Dabei ist das Verlegen der Luft- Elektro- und Wasserleitungen besonders kostenintensiv. Die Kosten von Speicherseen betragen grob:

- 1.5 bis 2.5 Millionen Franken für 30'000 bis 50'000 m<sup>3</sup> Speichervolumen
- 3 bis 3.5 Millionen Franken für einen Speichersee mit 80'000 m<sup>3</sup> Volumen.

### 9.1.1 Investitionskosten einiger ausgewählter Einzelkomponenten

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| Neue Lanze (inkl. Schacht)                 | 5'000 bis 12'000 CHF/Stück  |
| Ersatz ganze Lanze                         | 4'500 CHF/Stück             |
| Umrüsten alte Lanze auf effizientes System | 1'500 bis 2'000 CHF/Stück   |
| Propellermaschine                          | 45'000 bis 65'000 CHF/Stück |

## 9.2 Betriebskosten

Eine grobe Abschätzung der Betriebskosten der technischen Beschneigung pro Jahr und Kilometer ergibt Betriebskosten von 20'000 bis 30'000 Franken. Gemäss einem Bericht von CIPRA betragen die Betriebskosten der technischen Beschneigung im Kanton Wallis durchschnittlich 50'000 Franken pro Kilometer.[10] Andere Quellen beanschlagen diese auf 80'000 – bis 100'000.- pro Jahr – Tendenz steigend. Die Betriebskosten sind je nach Anlagentyp, Wasserverfügbarkeit und Lage sehr unterschiedlich. Dabei dürfte der zu bezahlende Wasserpreis die Kosten massgeblich beeinflussen.

## 10. Möglichkeiten den Energie- und Wasserverbrauch zu optimieren

Die Experten sind sich einig: Es besteht ein Energie- und Wasser Einsparpotential durch Betriebsoptimierung bei den technischen Beschneiungsanlagen. Die Grösse des Einsparpotentials kann jedoch stark variieren. Genaue Angaben zur Grössenordnung wollte niemand machen.

Von den Experten wurden mögliche „Energielecks“ in folgenden Bereichen ausgemacht:

### 10.1 Optimierungsmassnahmen ohne Investitionsfolgen

1. Schneeproduktion
  - falsch eingestellte Düsen: bei trockener Witterung entstehen zu feine Tropfen, welche unmittelbar verdunsten, ohne dass Schnee entsteht (viel Wasser und Druckluft gebraucht und kein Schnee produziert).
  - Verstopfte Düsen bei Lanzen, die nur „Regen“ produzieren (sollte der Schneimeister schnell merken).
  - Falsche Einstellung der Sensoren (Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit) an der Automatik
  - Keine regelmässige Überwachung der Anlage im Betrieb (vor Ort)
  - Nur Schneien, wenn die klimatischen Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wind) dies erlauben

- 2. Steuerung - Nachrüsten der Wasser-Pumpen mit Frequenzumrichtern
- 3. Automatisierung - Die starke Automatisierung birgt die Gefahr, dass diese zum Anlass genommen wird, den Personalaufwand zu reduzieren. Was zur Folge hat, dass die Anlagen zuwenig kontrolliert werden und dadurch Fehler/Mängel nicht frühzeitig erkannt werden.
  - Kleine Skigebiete (oft in tiefen Lagen) verfügen oft nicht über die finanziellen Mittel, die Anlagen zu automatisieren. Der manuelle Betrieb erfordert mehr Wissen. Die Anlagen sind dadurch auch Fehleranfälliger.
- 4. Depotschneien - Gegenüber dem Depotschneien – Schneien auf Vorrat und anschliessendes verteilen - bestehen einige Vorbehalte, da bei diesem bis zu 20-30% Schneeverluste vermutet werden.
- 5. Leckagen - Leckagen im Druckluftsystem sind ein geringes Problem (wenig Betriebsstunden pro Jahr). Savognin hatte in den letzten 30 Jahren ein Leck.

## 10.2 Optimierungsmassnahmen mit Investitionsfolgen

Der Ersatz eines bestehenden Beschneigungssystems durch neuere energieeffiziente Modelle birgt das grösste Potential, ist jedoch gleichzeitig mit Kosten verbunden. Aufgrund der tiefen jährlichen Betriebsstunden der Anlagen (250 bis 350 Stunden) zahlen sich reine Investitionen in die Energieeffizienz kaum aus. Bemerkung: Massnahmen, wie das Umrüsten von Lanzen – ohne dass altershalber ein Ersatz ansteht – könnten die länge Rückzahldauer eine Investition hemmen.

|           |                                   |                         |
|-----------|-----------------------------------|-------------------------|
| Annahmen: | Druckluftleistung alte Lanze      | 12 kW                   |
|           | Druckluftleistung neue Lanze      | 4.5 kW                  |
|           | Einsparung                        | 7.5 kW                  |
|           | Betriebszeit                      | 300 h/a                 |
|           | Energiepreis                      | 15 Rp./kWh              |
|           | Einsparung Energiekosten pro Jahr | 340 Franken/Jahr        |
|           | Investitionskosten                | 1'500 bis 2'000 Franken |
|           | Rückzahldauer der Investition     | 4 bis 6 Jahre           |

Die Lanze müsste somit noch weitere betriebliche Vorteile bieten.

- 1. Umrüsten „alter“ Erzeuger - Die beste Möglichkeit, die Effizienz der Anlage zu verbessern ist, ein effizientes Beschneigungssystem einzusetzen. Dabei darf der Fokus nicht nur auf die Energieeffizienz gesetzt werden. Die Kanone muss auch Schnee produzieren („*Wir benötigen eine Kanone die m<sup>3</sup> Schnee liefert und nicht nur Reif produziert*“)
  - Umrüsten von ineffizienten Systemen auf neue, effiziente Systeme (z.B. alte Arlberglanzen durch neue effizientere Lanzen ersetzen).
  - Wahl eines effizienten Schneeerzeugers. Mittels Schneiversuchen (Bergbahnen Lech, AUT) kann die Effizienz der Anlagen bei unterschiedlichen Feuchtkugeltemperaturen<sup>6</sup> gemessen und verglichen werden. [10]

<sup>6</sup> Feuchtkugeltemperatur siehe Anhang A3

- 2. Gelände - Ebene Unterlage (gröbste Hindernisse wie Steine entfernen).
- 3. Steuerung - Probleme können die hohen Anlaufströme der Kompressoren machen. Wenn ein Y- $\Delta$  Anlauf zu grosse Schläge im Netz verursacht, muss ein Sanftanlauf eingebaut werden. Anstelle des Sanftanlaufs kann das Problem auch mit einer Drehzahlregelung behoben werden. Erste Anlagen werden diese Saison in Betrieb genommen. Dank der Drehzahlregelung wird auch ein konstanterer Betrieb (Druck und DL-Temperatur) erwartet und als weiterer Nebeneffekt ein geringer Energieverbrauch (-35%).

### 10.3 Anlagen Neubau und Ausbau

- 1. Speichersee - Wenn Speicherseen im Skigebiet möglichst über der Höhenkote des Pistenanlaufes liegen, kann sehr viel Energie gespart werden, Druckaufbau mittels Gravitation (Nutzung des Gefälles, keine Druckerhöhung erforderlich). Oft ist die Lage von Speicherseen jedoch aufgrund der Topographie und Höhe/Lage vorgegeben.

### 10.4 Weitere Massnahmen

- 1. Schneezusätze - Schneezusätze (z.B. Snomax) sind umstritten. Sie sind in der Schweiz zugelassen und erhöhen die Effizienz der Anlagen um 10 – 30% (bis 50% gemäss dem Hersteller). Mit Snowmax kann ab -3°C Feuchtkugeltemperatur geschneit werden. Dem gegenüber stehen ökologische Fragen wie: „Auswirkungen von Snomax auf verschiedene alpine Pflanzenarten waren unterschiedlich (wachstumsfördernd und wachstumshemmend)“ [17].
- 2. Stromerzeugung - Wassersystem könnte für Stromgewinnung (analog den 69 Trinkwasserkraftwerken im Kanton GR) ausgebaut werden. Dazu wären rund 200 Meter Höhendifferenz (ergibt bis 20 bar) notwendig. Zudem müsste eine entsprechende Konzession vorliegen. Erste Projekte werden im Kanton Graubünden diskutiert.
- 3. Lastmanagement - Dank einem Lastmanagement der Bergbahnen können – speziell in der Vorsaison – Leistungsspitzen vermieden und dadurch Kosten gespart werden.

## 11. Aus- und Weiterbildungsangebote

Seilbahnen Schweiz ist für die Lehrlingsausbildung und die Ausbildung der Seilbahnfachleute zuständig. Zudem ist der Verband im Bereich der Weiterbildung für den Pistendienst aktiv. Die Weiterbildung allgemein und auch die der Schneimeister wird vom Verband Technisches Kader (VTK) koordiniert.

Heute bestehen in der Schweiz noch keine Aus- und Weiterbildungsangebote für Schneimeister und technische Leiter von Beschneiungsanlagen. Für Pistenpräparation gibt es von Seilbahn Schweiz einen Kurs. Dieser enthält etwas über technischen Schnee. Die Schneimeister bilden sich durch Messebesuche und Ausbildungen bei ihren Lieferanten weiter.

In Österreich (Schneimeisterkurse von ÖWAV) und in Frankreich (ANPCN, [www.anpnc.com](http://www.anpnc.com)) gibt es Kurse für Schneimeister.

Generell besteht in der Schweiz ein Bedarf nach Weiterbildungsangeboten im Bereich der technischen Beschneigung. Der Aufbau einer Weiterbildung, wie sie an der Schneiakademie in Österreich angeboten wird, wird unter den Fachleuten aktiv diskutiert. Der SBS und VTK planen einen Kurs "Optimierung der technischen Beschneigung" (OTB). Anfangs November 2008 fand ein Kick-Off Meeting Start, bei dem die Experten beider Verbände über die Struktur und die Inhalte diskutieren. Zudem soll der Einbezug von weiteren Akteuren (z.B. Herstellern...) andiskutiert werden. Ein möglicher Pilotkurs könnte bereits in der Saison 08/09 stattfinden.

## 12. Bedarf an Werkzeugen

### 12.1 Praxisbezogenes Werkzeug für Praktiker

Das gemeinsame Erarbeiten eines einfachen, praxisbezogenen Werkzeuges für die Praktiker (in der Art: Tipps Eismeister) wird begrüsst.

### 12.2 Erfahrungsaustausch

Zudem findet heute der Erfahrungsaustausch meist bilateral (Savognin mit Laax, oder Savognin mit Lenzerheide...) statt. Die Idee eines Erfahrungsaustausches in einer Gruppe könnte eventuell interessant sein.

### 12.3 Prüfverfahren für technische Beschneiungsanlagen weiterentwickeln

Die Betreiber vermuten, dass die Angaben der Hersteller zur Schneemenge und zu den Grenztemperaturen sind in der Regel eher zu optimistisch formuliert sind. Savognin testet darum die Kanonen selber und macht selber Messungen. So sieht man, ob diese funktionieren, guten Schnee machen und effizient laufen. In Österreich werden von Michael Manhart Schneekanonen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen getestet [10]. Um die Wahl der „richtigen“ Schneekanone zu vereinfachen könnte man die Idee einer gemeinsamen Schneekanonen-Prüfstelle für die Alpenländer prüfen.

## **13. Laufende Studien und Arbeiten**

### **13.1 Projekt Snowfarming**

Die Idee des Snowfarming ist, den Schnee bei idealen Bedingungen zu erzeugen und anschliessend durch Abdeckung mittels Sägemehl oder Folien zu konservieren. Es gibt Anwendungen die bereits im Oktober Schnee benötigen (z.B. kleine Loipe für Langlauftraining der Profis). Wird der Schnee mit einer Schneekanonone im Oktober (bei  $-5^{\circ}\text{C}$ ) erzeugt müssen diese für ein Volumen von  $3'000\text{ m}^3$  200 Stunden im Betrieb sein. Wird der Schnee im Vorjahr erzeugt und geht man davon aus, dass dieser während dem Sommer unter der Abdeckung um 30% schmilzt müssen  $4'300\text{ m}^3$  erzeugt werden. Da die Schneekanonen bei den tiefen Aussentemperaturen effizienter arbeiten sind diese für die  $4'300\text{ m}^3$  nur 53 Stunden in Betrieb. Somit kann der Energieverbrauch durch Snowfarming um den Faktor 4 reduziert werden.

### **13.2 Projekt „Juste Neige“**

Die HES-SO Sierre, die Uni Lausanne und verschiedene Wintersportorte (Zermatt, Verbier...) führen das Projekt Juste Neige durch. Die Idee ist, die bedarfsgerechte Schneeproduktion – also nur soviel Schnee zu produzieren, wie man braucht. Dazu soll die optimale Schneehöhe anhand der Wetterprognose bestimmt werden. Es wird geschätzt, dass dadurch gegen 10% technischer Schnee (und damit die entsprechende Energiemenge) eingespart werden kann. Zermatt, welches heute 60% der Pisten beschneit (250 ha) und jährlich rund  $660'000\text{ m}^3$  Schnee produziert könnte mit einer bedarfsgerechten Schneeproduktion rund CHF 260'000.- im Jahr sparen.

### **13.3 Studie Grischconsulta: Energiemanagement Bergbahnen**

Grischconsulta plant eine Studie zum Energiemanagement von Bergbahnen. Es ist geplant, die technisch ausgerichtete Studie im 2009 durchzuführen. Die Ergebnisse werden voraussichtlich anlässlich des Tourismusforum Alpenregion im Frühjahr 2010 präsentiert.

Die Idee der Studie ist den Energieverbrauch der Seilbahnbetriebe inklusive der Gebäude, Fahrzeuge und auch der der technischen Beschneigungsanlagen zu ermitteln.

### **13.4 Studie IDT-HSG St. Gallen: Wertschöpfung Beschneigungsanlagen**

Der SBS hat Dr. Thomas Bieger vom Institut für Öffentliche Dienstleistungen und Tourismus (IDT-HSG) eine Studie in Auftrag gegeben, welche die Wertschöpfung der Beschneigung analysieren soll. Die Studie wird Ende Februar 2009 abgeschlossen. Die Ergebnisse sollen anlässlich einer Tagung „30 Jahre Beschneigung“ im März 2009 in Savognin präsentiert werden.

### **13.5 Fact Sheet Strommarktliberalisierung**

Die Bergbahnen befürchten, dass durch die Strommarktliberalisierung die Stromtarife steigen. Der SBS erarbeitet momentan ein Fact Sheet Strommarktliberalisierung, das den Mitgliedern aufzeigen wird, auf welche Punkte sie bei der Verhandlung mit dem EW achten sollen.

## **14. Schlussfolgerungen**

Der steigende Strompreis, die Bedürfniszunahme nach technischem Schnee und der verschärfte Wettbewerb unter den europäischen Wintersportorten helfen, das Thema Energieeffizienz bei den Bergbahnen zu etablieren.

### **14.1 Effizientpotential wäre vorhanden**

Technische Beschneiungsanlagen bergen ein Energieeffizienzpotential, das durch eine Betriebsoptimierung erschlossen werden kann. Genaue Angaben zur Grössenordnung des Potentials können die Experten nicht machen. Aus Erfahrungen von anderen Betriebsoptimierungs-Projekten (Kunsteisbahnen, Hallenbäder, Gewächshäuser...) kann man von einem Potential von 10 bis 15% ausgehen. Bei einem jährlichen Energieverbrauch der technischen Beschneiung von 60 GWh beträgt das Effizienz-Potential durch Betriebsoptimierung rund 6 bis 10 GWh/a oder zwischen 0.8 bis 1.6 Mio. CHF pro Jahr.

### **14.2 Tipps für Schneimeister entwickeln und in Aus- und Weiterbildung integrieren**

Es besteht jedoch ein Bedarf nach einem einfachen, praxisbezogenen Werkzeug mit Tipps zur Betriebsoptimierung für den Schneimeister..

Da Seilbahnen Schweiz mit dem VTK im Oktober 2009 den Ausbildungskurs "Optimierung der technischen Beschneiung (OTB)" durchführt, ist es sinnvoll, das Thema Energieeffizienz bei der technischen Beschneiung und die Erarbeitung der Tipps für die Schneimeister mit der OTB-Ausbildung zu koppeln. So wird es möglich, dass die Botschaften von den beiden Verbänden mitgetragen und über deren Ausbildungskanäle verbreitet werden.

### **14.3 Pflichtenheft Prüfverfahren für Schneeerzeuger erarbeiten**

Dank einem einheitlichen Prüfverfahren könnte die Effizienz (Schneemenge, Energieverbrauch...) der Schneeerzeuger bei verschiedenen Betriebsbedingungen durch ein unabhängiges Institut ausgemessen werden. Das Prüfverfahren soll auf den Arbeiten von Michael Manhart (Lech) [10] oder anderen internationalen Prüfverfahren aufbauen resp. diese sofern sinnvoll diese übernehmen. Die Bergbahnen erhalten so einen neutralen Überblick zur Effizienz der den angebotenen Schneeerzeuger und müssen vor einer Neubeschaffung nicht alle Systeme von Grund auf analysieren. In einem ersten Schritt könnte in Koordination mit andern Alpenländern ein Pflichtenheft für die Ausarbeitung eines Prüfverfahrens ausgearbeitet werden.

### **14.4 Fokus: Bestellerkompetenz bei Neuanlagen und Erneuerungen**

Da die technischen Beschneiungsanlagen nur rund 300 Stunden im Jahr im Betrieb sind, zahlen sich bereits kleine Investitionen für die Verbesserung der Energieeffizienz bei bestehenden Anlagen nicht aus. Dagegen besteht beim Bau von neuen und beim Ersatz von bestehenden Anlagen ein grösserer (finanzieller) Handlungsspielraum. In diesen Situationen werden ohnehin Investitionen getätigt. Es wird darum empfohlen, den Fokus auf die Verbesserung der Bestellerkompetenz der Bergbahnen zu legen und so sicherzustellen, dass künftig effiziente Anlagen, die (Energie-)optimiert werden können gebaut werden. Gemeinsam mit dem kleinen Kreis von Fachplanern und Anlagelieferanten sollen die kritischen Punkte bei der Planung zusammengestellt werden (Wo können „Energielecks“ entstehen?). Daraus sollen entsprechende Empfehlungen abgeleitet und für die Besteller (Bergbahnen) aufgearbeitet werden.

## 14.5 Vernetzung Akteure

Zur Zeit wird an verschiedenen interessanten Studien und Projekte gearbeitet. Mit dem Ziel die Informationen zwischen den verschiedenen Akteuren<sup>7</sup> besser verbreiten und künftig allfällige Synergien zwischen den Projekten zu nutzen (z.B. Befragung der Bergbahnen) sollte eine bessere Vernetzung angestrebt werden. Seilbahnen Schweiz könnte im Frühjahr 2009 zu einem Experten-Roundtable einladen. Die Idee des Roundtables ist, nebst der Vernetzung eine detaillierte Auslegeordnung der Aktivitäten zu erstellen, allfällige Lücken aufdecken und die Rollen der verschiedenen Akteure zu klären.

---

<sup>7</sup> Hochschulen/Forschungsanstalten (z.B. Mathieu Fauve, SLF...), Betreiber, Hersteller/Lieferanten, EVU und Experten aus der Wirtschaft (z.B. Roland Zegg Grischconsulta; Thomas Bieger vom Institut für Öffentliche Dienstleistungen und Tourismus...), Seilbahnverband, VTK, BFE...

# Anhang

## A1 Quellen, Literatur

- [1] Betrachtungen zu einem nachhaltigen Einsatz von Schneekanonen  
Berchtold, Polizzi +Bösch; FHBB; [ohne Datum]
- [2] Endfassung einer Beschneigungs-Fibel für die Planung, Erweiterung oder den Umbau einer Schneeanlage, <http://www.seilbahn.net/snn/dokumente.php?wert=19>
- [3] <http://de.wikipedia.org/wiki/Beschneigung>
- [4] Schnee im Spätherbst dank Bergbautechnik, Medienmitteilung Zermatt Tourismus, Oktober 2007
- [5] Fakten und Zahlen Seilbahnstatistik 2008, Seilbahnen Schweiz, Bern
- [6] Kampagne effiziente Druckluft, [www.druckluft.ch](http://www.druckluft.ch)
- [7] Klimawandel und Wintertourismus: Ökonomische und ökologische Auswirkungen technischer Beschneigung., SLF, 2007
- [8] Beurteilung von Beschneigungsanlagen, Eine Arbeitshilfe für Betreiber, Planer, Gemeinden, Naturschutzorganisationen und Amtsstellen, Amt für Natur und Landschaft GR, 28. Oktober 2003
- [9] Bilanzierung und Reduktion der CO2-Emissionen in der Landschaft Davos, Eine Machbarkeitsstudie zum Klimaschutz, SLF, 1. Dezember 2006
- [10] Künstliche Beschneigung im Alpenraum. Ein Hintergrundbericht. CPIRA, 2004
- [11] GATS, Tourismus und die Umwelt, Eine Studie im Auftrag der Erklärung von Bern (EvB), Basel, September 2006
- [12] Von der Kunst, Schnee zu machen, Vortrag Technoalpin
- [13] Nussy (Neues Energieeffizientes Schneilanzen System), Bächler Top Track AG, 2008
- [14] Handbuch Pistenpräparation + Pflege, SLF, Davos
- [10] Prüfbericht, SUFAG Compact Power, Techn. Rat Dipl.-Ing. MICHAEL MANHART, A-6764 LECH am Arlberg <http://www.seilbahn.net/newslines/Compact%20Power-Messung%20Lech%201-2005.pdf>
- [16] Erfolgsfaktoren, Geschäfts- und Finanzierungsmodelle für eine Bergbahnindustrie im Wandel, Referat anlässlich der GV SBS am 27.10.2005, Prof. Dr. Thomas Bieger, Prof. Dr. Christian Laesser
- [17] Kunstschnee und Schneezusätze: Eigenschaften und Wirkungen auf Vegetation und Boden in alpinen Skigebieten, Zusammenfassung eines Forschungsprojektes, am Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos, 2002
- [18] Interviews mit den eingangs erwähnten Expertinnen und Experten
- [19] Energie im Tourismus, Medienorientierung „Schneegarantie Graubünden“, Armin Tanner, Amt für Energie Graubünden, 15.11.2007
- [20] ÖWAV-Regelblatts 210 "Beschneigungsanlagen", Juli 2007, Wien
- [21] [www.seilbahn.net](http://www.seilbahn.net)

## A2 Abschätzung Energieverbrauch

### Bottom-Up 1: Abschätzung anhand Anzahl installierter Kompressoren/Anlagen

|  | Anzahl Stk. | Leistung kW | Total Leistung MW | Betriebsstunden h/a | Energieverbrauch GWh/a |
|--|-------------|-------------|-------------------|---------------------|------------------------|
|--|-------------|-------------|-------------------|---------------------|------------------------|

132 bis 250 <sup>[1]</sup>

#### Hochdruckanlagen

|              |                   |                    |                    |                    |      |
|--------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------|
| Kompressoren | 65                |                    | 12.0               |                    |      |
| Lieferant 1  | 45 <sup>[1]</sup> | 180                | 8.1 <sup>[1]</sup> |                    |      |
| Lieferant 2  | 20 <sup>[1]</sup> | 200                | 4.0 <sup>[1]</sup> |                    |      |
| Lieferant 3  | 10 <sup>[1]</sup> | 200                | 2.0 <sup>[1]</sup> |                    |      |
| Andere       | 35 <sup>[1]</sup> | 170                | 6.0 <sup>[1]</sup> |                    |      |
| Pumpe        | 110               | 300 <sup>[3]</sup> | 33.0               |                    |      |
| <b>Total</b> |                   |                    | 65.0               | 300 <sup>[8]</sup> | 20.0 |

#### Niederdruck-Anlagen

|                       |                     |                    |       |                    |      |
|-----------------------|---------------------|--------------------|-------|--------------------|------|
| Niederdruck Maschinen |                     |                    |       |                    |      |
| Kompressor            | 4000 <sup>[2]</sup> | 5.5 <sup>[1]</sup> | 22.0  |                    |      |
| Ventilator            | 4000 <sup>[2]</sup> | 11 <sup>[1]</sup>  | 44.0  |                    |      |
| Niederdruck-Anlagen   |                     |                    |       |                    |      |
| Pumpe                 | 250 <sup>[4]</sup>  | 300 <sup>[4]</sup> | 75.0  |                    |      |
| <b>Total</b>          |                     |                    | 141.0 | 300 <sup>[8]</sup> | 42.0 |

|                      |  |  |              |  |             |
|----------------------|--|--|--------------|--|-------------|
| <b>Total HD + ND</b> |  |  | <b>206.0</b> |  | <b>62.0</b> |
|----------------------|--|--|--------------|--|-------------|

### Top Down 1: Abschätzung anhand spezifischer Energieverbrauchs-Werte

|  | Pistenfläche ha | davon beschneit % | beschneite Pistenfläche ha | Energieverbrauch kWh/a | spez. Energieverbrauch kWh/a ha | Energieverbrauch Schweiz GWh/a |
|--|-----------------|-------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
|--|-----------------|-------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|

#### Anlagen

|                    |                    |                    |                    |                          |        |      |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|--------|------|
| Davos Goetschna    | 750 <sup>[5]</sup> | 20% <sup>[5]</sup> | 150 <sup>[5]</sup> | 1'700'000 <sup>[5]</sup> | 11'333 | 82.3 |
| Scuol Motta Naluns | 480 <sup>[5]</sup> | 30% <sup>[5]</sup> | 144 <sup>[5]</sup> | 1'200'000 <sup>[5]</sup> | 8'333  | 60.5 |
| Braunwald          | 150 <sup>[5]</sup> | 3% <sup>[5]</sup>  | 4.2 <sup>[5]</sup> | 18'000 <sup>[5]</sup>    | 4'286  | 31.1 |
| Mittelwert         |                    |                    |                    |                          | 7'984  | 58.0 |

#### Schweiz

|                             |  |  |                     |  |                      |      |
|-----------------------------|--|--|---------------------|--|----------------------|------|
| spez. Werte aus SLF Projekt |  |  | 7260 <sup>[6]</sup> |  | 8'000 <sup>[7]</sup> | 58.1 |
|-----------------------------|--|--|---------------------|--|----------------------|------|

#### Quellen:

- [1] Schätzungen Kompressorlieferant
- [2] Schätzungen Kompressorlieferant: 200 Anlagen/a in 20 Jahren = 4'000 Anlagen
- [3] Annahme: durchschnittliche Pumpenleistung pro Anlage = 1/3 Pumpenleistung von Savognin
- [4] Annahme: Anlage hat im Schnitt 12 bis 18 ND-Kanonen
- [5] SLF: Klimawandel und Wintertourismus: Ökonomische und ökologische Auswirkung von technischer Beschneigung, 2007
- [6] Seilbahnen Schweiz, Fakten & Zahlen 2008
- [7] Gerundet
- [8] Annahme gemäss Angaben der Interviewpartner zu den Betriebszeiten von Beschneigungsanlagen (250 bis 400 h/a)

## A3 Theorie der Schneeproduktion

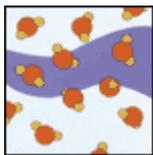
(Der folgende Text stammt von der Tschechischen Webseite von Snowmakers. Der Inhalt betrachten wir als sehr gut – obschon den Übersetzern einige sprachliche Schönheitsfehler unterlaufen sind. Der Text wurde von uns nicht redigiert.)

Quelle: SMI SNOWMAKERS, [www.snowmakers.cz](http://www.snowmakers.cz) 16.7.08

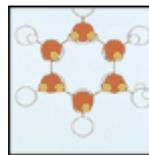
### A3.1 Der Prozess des Wärmeaustausches

Zu der Schneebildung kommt es dank der Wärmeübertragung. Die Wärme, die durch das Ausdünsten oder die Konvektion des Wassers freigesetzt wird, wärmt die Umgebung auf. Diese Wärme bildet hinter dem Propeller oder der Lanze ein besonderes sich von der Umgebung unterscheidendes Mikroklima, das sich im Wesentlichen unterscheidet. Das Begreifen des Wärmeaustauschprozesses ermöglicht ein besseres Benutzen der technischen Beschneigung.

Die Schneeproduktion wird von einer ganzen Variabelreihe beeinflusst. Zu den wichtigsten gehören die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit, die Nukleationstemperatur und die Grösse der Wasserspraytröpfchen des Schneeerzeugers.



das Gebilde der Moleküle des flüssigen Wassers



das Gebilde der Eiskristallmoleküle

### A3.2 Feuchtkugeltemperatur

Die Wassertropfentemperatur kann nicht unter die Feuchtkugeltemperatur der Umgebung sinken. Der Wert der Feuchtkugeltemperatur ist von der absoluten Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig. Das Thermometer, das Sie hinter dem Fenster haben, zeigt Ihnen „trockene“, also die normale Temperatur an. Stellen Sie sich vor, Sie wickeln die Quecksilberkugel in ein feuchtes Tuch – das Thermometer wird plötzlich einen anderen Wert anzeigen. Das passiert, weil das Wasser aus dem Tuch verdunstet und damit senkt die gemessene Temperatur. Je mehr Wasser verdunstet wird, desto mehr Wärme wird abgeleitet und Sie werden eine tiefere Temperatur ablesen können. Falls die Luft trocken sein wird, verdunstet das Wasser umso schneller. Falls die relative Luftfeuchtigkeit 100% betragen wird, kann das Wasser nicht verdunstet und in diesem Fall zeigt der „trockene“ Thermometer den gleichen Wert wie der befeuchtete Thermometer an. Wenn Sie mit einem Motorrad unterwegs sind, können Sie das Geschehen auf der eigenen Haut erleben. Bei heissem Wetter wird Ihnen im nassen Gewand nämlich kalt sein.

Die folgende Tabelle präsentiert die Feuchtkugeltemperaturwerte.

|                   |     | relative Luftfeuchtigkeit % |       |       |       |       |       |       |       |     |        |
|-------------------|-----|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|--------|
|                   |     | 20                          | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100 |        |
| Lufttemperatur °C | -10 | -12.3                       | -12   | -11.7 | -11.4 | -11.1 | -10.9 | -10.6 | -10.3 | -10 | Schnee |
|                   | -9  | -11.5                       | -11.2 | -10.9 | -10.6 | -10.3 | -10   | -9.6  | -9.3  | -9  |        |
|                   | -8  | -10.7                       | -10.4 | -10.1 | -9.7  | -9.4  | -9    | -8.7  | -8.4  | -8  |        |
|                   | -7  | -10                         | -9.6  | -9.2  | -8.9  | -8.5  | -8.1  | -7.8  | -7.4  | -7  |        |
|                   | -6  | -9.2                        | -8.8  | -8.4  | -8    | -7.6  | -7.2  | -6.8  | -6.4  | -6  |        |
|                   | -5  | -8.4                        | -8    | -7.6  | -7.2  | -6.7  | -6.3  | -5.9  | -5.4  | -5  |        |
|                   | -4  | -8                          | -7.7  | -6.8  | -6.3  | -5.8  | -5.4  | -4.9  | -4.5  | -4  |        |
|                   | -3  | -7.2                        | -6.9  | -5.9  | -5.5  | -5    | -4.5  | -4    | -3.5  | -3  |        |
|                   | -2  | -6.4                        | -6.2  | -5.1  | -4.6  | -4.1  | -3.6  | -3    | -2.5  | -2  | Regen  |
|                   | -1  | -5.6                        | -5.4  | -4.3  | -3.7  | -3.2  | -2.6  | -2.1  | -1.5  | -1  |        |
|                   | 0   | -4.8                        | -4.6  | -3.5  | -2.9  | -2.3  | -1.7  | -1.1  | -0.6  | 0   |        |
|                   | 1   | -4.1                        | -3.9  | -2.6  | -2    | -1.4  | -0.8  | -0.2  | 0.4   | 1   |        |
|                   | 2   | -3.3                        | -3.1  | -1.8  | -1.2  | -0.5  | 0.1   | 0.7   | 1.4   | 2   |        |
|                   | 3   | -2.5                        | -2.2  | -1    | -0.3  | 0.3   | 1     | 1.7   | 2.4   | 3   |        |
|                   | 4   | -1.6                        | -1.7  | -0.2  | 0.5   | 1.2   | 1.9   | 2.6   | 3.3   | 4   |        |
|                   | 5   | -0.8                        | -0.9  | 0.6   | 1.4   | 2.1   | 2.8   | 3.6   | 4.3   | 5   |        |
|                   | 6   | -0.1                        | 0.7   | 1.5   | 2.2   | 3     | 3.8   | 4.5   | 5.3   | 6   |        |

Ein Beispiel: die Tabelle beweist, dass die Bedingungen für die Schneeproduktion bei der Temperatur von  $-2.2^{\circ}\text{C}$  und 20%igen relativen Luftfeuchtigkeit gleich wie bei  $-6.3^{\circ}\text{C}$  und 90%igen relativen Luftfeuchtigkeit sind. In beiden Fällen hat nämlich die Feuchtkugeltemperatur den gleichen Wert.

### A3.3 Die Nukleationstemperatur

Falls uns die Feuchtkugeltemperatur bekannt ist, können wir voraussagen, ob die Wassertropfen tatsächlich frieren werden. Die Umwandlung des Wassers in Eis geschieht dank der Nukleation – dass der Wassertropfen friert, muss zuerst die eigene Nukleationstemperatur erreicht werden. Es gibt zwei Arten der Nukleation: homogene und heterogene.

#### Die homogene Nukleation

Zu der homogenen Nukleation kommt es, falls das Wasser keinen Kontakt mit fremden Zusätzen oder Oberflächen hat. Zu der Zustandsumwandlung kommt es während der homogenen Nukleation entweder durch die Temperatursenkung oder durch die Druckveränderung. Den grösseren Einfluss auf das Gefrieren des Wassers hat die Temperatur.

Die homogene Nukleation beginnt, wenn eine ganz kleine Molekülengruppe den festen Zustand erreicht hat. Diese Molekülengruppe – Nukleationskeim – ist der Wachstumsgrund der weiteren Kristalle, dieser Keim bleibt erhalten, bis der ganze Wasserinhalt gefroren wird. Der Prozess der Kristallbildung hängt von der Menge der abgeleiteten latenten Erstarrungswärme ab. Die Wassermoleküle binden sich sehr schnell an den Keim an. Während des Kristallwachstums wird die Energie frei, die das Abkühlen der angebundenen Moleküle verursacht. Das Kristallwachstum wird fortgesetzt, bis sich alle Moleküle angebunden haben. In diesem Moment wird aus dem Wasser Eis.

Die Leute glauben gewöhnlich, dass das saubere Wasser bei  $0^{\circ}\text{C}$  friert. In Wirklichkeit kommt es zu der Nukleation (Frieren) des sauberen Feinwassers bei  $-40^{\circ}\text{C}$ . Zu dem Geschehen, genannt „supercooling“, kommt es in der höheren Troposphäre oder bei den Laborversuchen vor.

## Heterogene Nukleation

Bei Temperaturen über  $-40^{\circ}\text{C}$  kommt es zu einer Zustandumwandlung dank den fremden Zusätzen im Wasser (natürliche Mineralien, Feinstaub...). Diese Stoffe verhalten sich wie Keime. Sie funktionieren gewöhnlich bei höheren Temperaturen, als die Keime bei der homogenen Nukleation. Die Temperatur, an der sich ein Keim bildet, nennen wir der Nukleationspunkt. Genauso wie die homogene Nukleation wird auch die heterogene Nukleation durch die zwei wichtigsten Fakten gesteuert: durch den Energieaustausch bei der Keimbildung und durch die Wachstumsgeschwindigkeit des Kristalls. Bei der heterogenen Nukleation wird der grundsätzliche Einfluss auf das Wasserfrieren durch die Konfiguration des Nukleationspunktes und die Energieübertragung ausgeübt.

Während der Schneeproduktion kommt es zu der heterogenen Nukleation. Das Wasser besitzt viele (natürliche) Zusätze, die sich wie Nukleatoren verhalten. Verschiedene Zusatzarten nukleieren das Wasser bei verschiedenen Temperaturen. Fremde Zusätze teilen wir in zwei Gruppen ein: Hochtemperaturzusätze (Jodide, Trockeneis, Eiweissstoffe) und Niedrigtemperaturzusätze (Kalzium, Natrium, in allgemeinem Mineralstoffe). Im Wasser, das wir zu der Schneeproduktion benutzen (Gebirgsbäche und Flüsse, und öffentliche Wasserleitungen), befindet sich eine grosse Menge an natürlichen Niedrigtemperaturnukleatoren. Die Nukleationstemperatur dieses Wassers liegt üblicherweise zwischen  $-10^{\circ}\text{C}$  bis  $-6^{\circ}\text{C}$ .

Der Prozess des Frierens wird von einem weiteren Geschehen beeinflusst – die Oberflächenart (Strassen, Bäume) auf der sich beispielsweise auf der Strasse das Glatteis bildet. Zwischen der Oberfläche und dem Nukleationspunkt kommt es zum Energieaustausch, der das Frieren bei der Temperatur nahe der  $0^{\circ}\text{C}$  Marke verursacht.

Bei der Aggregatzustandsänderung (Wasser –Schnee) wird die Wasserumwandlungstemperatur in Eiskristalle durch den Nukleator mit der höchsten Nukleationstemperatur bestimmt. Versuche haben bewiesen, dass 95% des natürlichen, nicht gepflegten Wassers bei sehr unterschiedlichen Temperaturen friert. Die durchschnittliche Nukleationstemperatur des Naturwassers liegt bei  $-7.7^{\circ}\text{C}$ . Durch die Zugabe des Hochtemperaturnukleators wird die Temperatur, bei der das Wasser friert, erhöht. Mit Snomax wird der Punkt, bei dem das Wasser friert, bei  $-2.9^{\circ}\text{C}$  liegen.

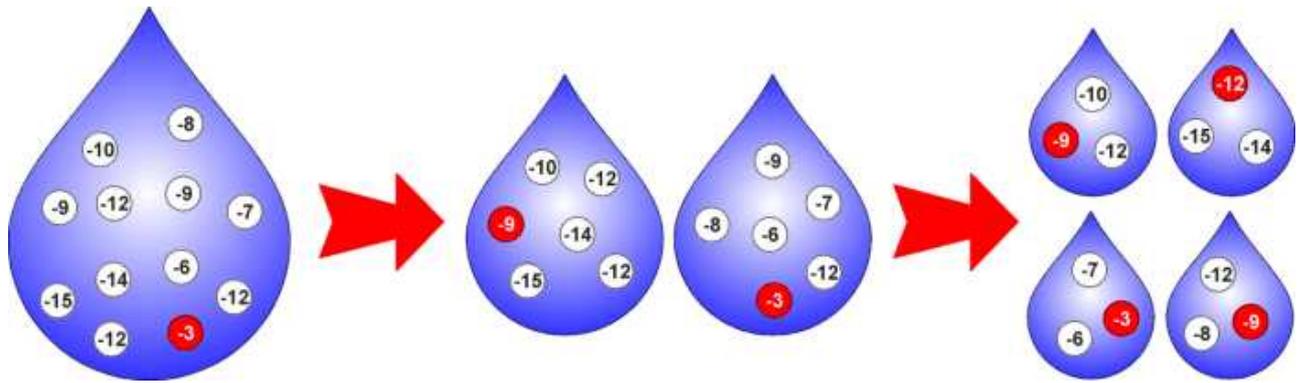
## Tröpfchengrösse

Die Verteilung von Nukleatoren im gegebenen Wasserinhalt ist rein zufällig, deswegen wird die Temperatur des Wassertröpfchenfrierens durch ihr Volumen beeinflusst. Falls sich das Wassertröpfchen verkleinert, ist auch die Wahrscheinlichkeit kleiner, dass sie einen Hochtemperaturnukleator beinhalten wird. Das heisst, dass in grösseren Tröpfchen die Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit des Hochtemperaturnukleators höher ist. Für die Schneeproduktion ist die Situation am optimalsten, wenn in jedem Wassertröpfchen, das die Schneekanone verlässt, mindestens ein Hochtemperaturnukleator anwesend ist und deshalb frieren alle Tröpfchen noch vor der Landung.

Das Verhältnis zwischen der Nukleationstemperatur und der Wassertröpfchengrösse beschreiben zwei statistisch belegte Entschlüsse.

1. Die Vergrösserung des Wassertröpfchenvolumens um die Hälfte erhöht die Nukleationstemperatur um  $0.56^{\circ}\text{C}$
2. Das Verkleinern des Wassertröpfchenvolumen um die Hälfte senkt die Nukleationstemperatur um  $1.67^{\circ}\text{C}$ .

Diese Regeln gelten für die durchschnittliche Wassertröpfchengrösse während der Schneeproduktion, falls keine Hochtemperaturnukleatoren zugesetzt sind.



Das Bild zeigt ein Beispiel der zufälligen Verteilung der Nukleatoren in den Wassertropfchen. Einzelne Zahlen stellen die Nukleationstemperaturen von verschiedenen Zusätzen (Staub, Pollen, feine Sandteilchen usw.) dar. Der grosse Tropfen beginnt bei  $-3^{\circ}\text{C}$  zu frieren. Falls wir diesen Tropfen in zwei kleineren teilen, friert bei  $-3^{\circ}\text{C}$  nur die Hälfte, die einen Hochtemperaturnukleator in sich trägt, die zweite Hälfte fängt zuerst bei  $-9^{\circ}\text{C}$  zu frieren an. Die rote Farbe deutet auf den Nukleator mit der höchsten Temperatur hin, der den Prozess des Frierens startet. Falls wir die entstehenden zwei Tropfen noch einmal halbieren, wird bei  $3^{\circ}\text{C}$  nur ein Viertel des Wasservolumen frieren!

Schauen wir uns, die Verhältnisse zwischen der Tropfengrösse und dem Verdunsten jetzt näher an. Wir können folgenden Schluss ziehen:

Wenn wir die Wassertropfengrösse ins Verhältnis zu der Nukleationstemperatur stellen und die Hochtemperaturnukleatore gemeinsam mit grösseren Tropfen benutzen, können wir die Schneeproduktion verbessern. So werden wir nicht nur den Wasserdurchfluss erhöhen, sondern sinken wir auch die Verluste der kleineren Kristalle durch die Thermik, den Wind und durch das Verdunsten. Mehr Schnee wird dort landen, wo wir ihn tatsächlich benötigen.

Messungen haben gezeigt, dass das Erhöhen vom Wasservolumendurchfluss um 20% die Schneeproduktion um bis zu 40% steigert. Diese bestätigen die nicht erwünschten Ergebnisse der Wasserumwandlung in kleinere Tröpfchen, vor allem dort, wo wir eine beschränkte Wassermenge zur Verfügung haben.

Falls wir die Verhältnisse zwischen der Feuchtkugeltemperatur, der Nukleationstemperatur und der Wassertropfensprähgrösse begreifen, werden wir fähig sein alle physikalische Geschehen auszunutzen und folge dessen die Wirksamkeit und die Qualität der Schneeproduktion zu verbessern.

(Quelle: SMI SNOWMAKERS, [www.snowmakers.cz](http://www.snowmakers.cz) 16.7.08)

## A4 Diverses

### A4.1 Schneequalität - Bearbeitungsprozess

Das Ziel der technischen Beschneigung ist, gute Pisten für den Kunden mit möglichst wenig Aufwand, möglichst ökonomisch und ökologisch zu erreichen. Die Pistenqualität und die Schneequalität sind abhängig von verschiedenen Einflussfaktoren. Es ist zentral, wann der Schnee bearbeitet wird.

Feuchter Schnee muss vor der Bearbeitung ruhen, so dass das in den Schneekugeln eingeschlossene Wasser gefriert (Bei bewölktem Himmel kann es jedoch sein, dass sehr nasser Schnee sehr lange braucht um zu trocknen. In diesem Fall müsste man die Piste sperren, was in der Praxis jedoch meist nicht möglich ist. Nach der Bearbeitung muss der Schnee nochmals genügend Zeit haben um sich zu festigen (Sinterungsprozess). Darum werden Pisten oft am Abend präpariert. Entstehen einmal Eisflächen (Beschneigung bei falschen Temperaturen....) bleiben die während der ganzen Saison liegen.

### A4.2 Nuklationstemperatur

Als Nuklationstemperatur wird die Temperatur bezeichnet, bei der die Phasenumwandlung von Wasser zu Schnee erfolgt.

#### ---- Normalfall:

Wassertemperatur 4°C

Nuklationstemperatur -8 bis -10 °C

Schneetemperatur 0°C

#### ---- mit Snow Max:

Wassertemperatur 4°C,

Nuklationstemperatur -4 °C

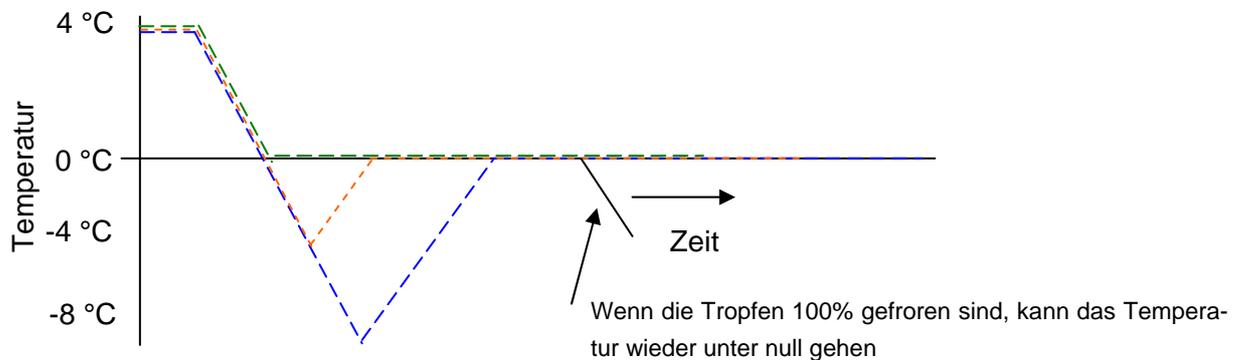
Schneetemperatur 0°C

#### ---- mit Eisinjektion:

Wassertemperatur 4°C

Nuklationstemperatur 0 °C

Schneetemperatur 0°C



Grafik: Im Normalfall wird 4 °C kaltes Wasser ausgeblasen. Die Wassertropfen kühlen sich bis zur Nuklationstemperatur -8° ab und wandeln sich zu Schnee. Anschliessend steigt die Schneetemperatur wieder auf 0 °C. Mit Snowmax oder Eisinjektion kann bei höheren Nuklationstemperaturen Schnee erzeugt werden.

**A5 Muster Prüfbericht Manhart**

Techn. Rat Dipl.-Ing. MICHAEL MANHART  
 A-6764 LECH am Arlberg  
 Skilifte Lech, Ing. Bildstein Ges.m.b.H. (zertif. ISO 9001 + 14001),  
 Rüfikopf-Seilbahn AG  
 Bergbahn Lech-Oberlech, Hoch KG  
 Tel. A-(0)5583/2332-0, Fax. -30, E-Mail: manhart.michael@skiarlberg.at  
 Hotel Hinterwies, Tel. 2531-0

**PRÜFBERICHT**

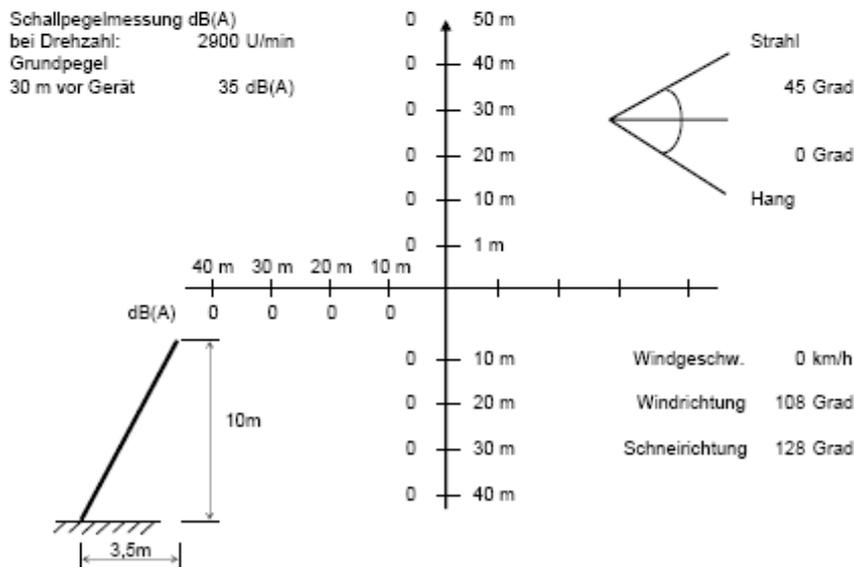
**Kanone:** SUFAG Compact Power

**Bemerkung:** Masch.Nr.292504

Beginn der Prüfung: 05.04.2005 08:58:37

Ende der Prüfung: 05.04.2005 09:13:37

Ausgabe Prüfbericht: 05.04.2005 09:13:37



| Messung   |                       | Start   | Mitte                 | Ende  | Kommentar   |   |
|---|-----------------------|---------|-----------------------|-------|---|---|
| Feuchtkugeltemperatur                             | [Grad C]              | -1,8    | -0,72                 | -0,5  | Messung Grenztemperatur   |   |
| Lufttemperatur Umgebung                           | [Grad C]              | 0,8     | 2,099                 | 2,5   |   |   |
| Luftfeuchtigkeit Umgebung                         | [%]                   | 57,2    | 55,8                  | 52,6  |   |   |
| Wassertemperatur an der Kanone                    | [Grad C]              | 3,04    | 2,991                 | 2,99  |   |   |
| Wasserdruck an der Kanone                         | [bar]                 | 23,68   | 24,61                 | 24,69 |   |   |
| Wassermenge                                       | [l/min]               | 80      | 81,35                 | 81    |   |   |
| Lufttemperatur an der Kanone                      | [Grad C]              |         |                       |       |   |   |
| Luftdruck an der Kanone                           | [bar]                 |         |                       |       |   |   |
| Luftmenge an der Kanone                           | [Nm³/min]             |         |                       |       |   |   |
| Elektr. Propeller + Kompressor (o.Licht)          | [kW]                  | 22,03   | 21,61                 | 21,67 |   |   |
| spez. Schneegewicht                               | [g/l] = [kg/m³]       | 420,61  |                       |       |   |   |
| Verhältnis Luft/Wasser                            | [Nm³/min:m³/min]      |         |                       |       |   |   |
| Verhältnis El. Energie/Wasser                     | [kWh/m³]              | 5,36    |                       |       |   |   |
| Schneegewicht - Vorgabe                           | [kg/m³]               | 400-500 |                       |       | Kommentar<br>Schnee in Ordnung - kein freies Wasser                                       |   |
| Schneegewicht G inkl. Sumpf                       |                       |         |                       |       |   |   |
|   |                       | Gew.    | Höhe                  | Sumpf |   |   |
|   |                       | g/l     | cm                    | cm    |   |   |
| Schneemessungen                                   | Messbrett vor Mündung | 10 m    | 460                   | 1,6   |   | 0 |
|   |                       | 15 m    | 420                   | 2,0   |   | 0 |
|   |                       | 20 m    | 400                   | 1,7   |   | 0 |
|   |                       | 25 m    | 400                   | 1,3   | 0   |   |
| Durchschnitt Schneegewicht                        | [g/l]                 | 420,61  |                       |       |   |   |
| Freies Wasser                                     | [% der Schneehöhe]    |         |                       |       |   |   |
| Verhältnis el. Energie : Schnee                   | [kWh/m³]              | 2,25    |                       |       |   |   |
| Energieaufwand                                    |                       |         |                       |       | Kommentar<br>Anschlusswerte: Ventilator 17,84 KW<br>Kompressor 3,86 KW<br>Heizung 4,63 KW |   |
|   | Kanone über Pumpe     | [m]     | 4                     |       |   |   |
|   | Propeller             | [kW]    | 21,61                 |       |   |   |
|   | Pumpenleistung        | [kW]    | 4,51                  |       |   |   |
|   | Kompressor            | [kW]    |                       |       |   |   |
|   | Summe                 | [kW]    | 26,14                 |       |   |   |
| Einstellzeit                                      |                       | [min]   | 15                    |       |   |   |
| Schneizeit ca.                                    |                       | [min]   | 15                    |       |   |   |
| Drehzahl  | Wahl 1                | [U/min] | 2900                  |       |   |   |
|   | Wahl 2                | [U/min] |                       |       |   |   |
| Maximaler Wasserdurchsatz                         |                       | [l/min] | gemessen / Hersteller |       |   |   |
| max Wasserdurchsatz realistisch für Schneebetrieb |                       |         | /                     |       |   |   |
|   |                       |         | JA                    |       |   |   |
| Wurfweite max. bei Wind gem. Seite 1              |                       | [m]     | 40                    |       |   |   |
| Hauptschnegebiet ca.                              |                       | [m]     | 15                    |       |   |   |
| Tester:   |                       |         | Sepp Moser            |       |   |   |