

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 85 (1967)  
**Heft:** 46

**Artikel:** Die Bemessung von Trockenbeeten für Klärschlamm  
**Autor:** Nebiker, John H. / Munz, Walter  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-69577>

#### Nutzungsbedingungen

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

#### Conditions d'utilisation

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

#### Terms of use

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

**Download PDF:** 21.02.2026

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

die folgenden drei, rein geometrischen Parameter charakterisiert, Bild 8:

- a) Verhältnis Fensterbreite/Fensterabstand  $b/L$
- b) Verhältnis Raumhöhe/Fensterabstand  $H/L$
- c) Neigungswinkel der Fensterebene  $\varphi$

Uns interessiert die Verteilung des Himmelslichtanteils des Tageslichtkoeffizienten  $T_H$  auf der Arbeitsebene, die hier 1,00 m über Hallenboden angenommen wurde. Um den Einfluss der drei Parameter zu zeigen, wurde der maximale, der minimale und der mittlere Wert des Tageslichtkoeffizienten auf Arbeitsebene in Abhängigkeit von den einzelnen Parametern aufgetragen, Bilder 9, 10 und 11. Die Kurven können auch zur überschlägigen Bestimmung von  $T_H$  durch Extrapolation verwendet werden.

## 6. Vergleich der gerechneten Werte mit Lichtmessungen

Um die theoretisch ermittelten Werte mit Messresultaten vergleichen zu können, sind in einer kürzlich erstellten, im Betrieb stehenden Shedhalle der Schwerindustrie Lichtmessungen ausgeführt worden. Dach und Wände der Halle sind mit weißen Isolierplatten verkleidet. Die lichttechnischen Abmessungen, sowie die Messergebnisse sind in den Bildern 12, 13, 14 und 15 dargestellt. Die Messungen wurden im März 1967 zwischen 15 und 16 Uhr bei stark bedecktem Himmel mittels eines Messinstrumentes der General Electric ausgeführt. Die Beleuchtungsstärke aussen variierte während den Messungen zwischen 3000 und 6000 Lux. Während die Lichtverluste infolge Pfosten und Sprossen ( $k_1$ ) rechnerisch ermittelt worden sind, wurde die Lichtdurchlässigkeit des Glases ( $\tau$ ), sowie der Schwächungsfaktor infolge Verschmutzung ( $k_2$ ) direkt an den Fensterrändern gemessen. Die Werte  $\tau$   $k_2$  betrugen bei den Shedfenstern 0,67 (einfache Drahtverglasung, bereits mittlere Verschmutzung nach einer Betriebszeit von etwa 8 Monaten), bei den Fassadenfenstern 0,75 (einfache Klarverglasung, etwas geringere Verschmutzung).

Wie aus den Bildern ersichtlich, ergaben die Messungen um etwa 10 bis 15 % höhere Werte, als die Berechnung. Der (erwartete) Unterschied ist dem in der Berechnung nicht berücksichtigten Reflexionsanteil (hauptsächlich Innenreflexion  $R$ ) zuzuschreiben.

Es ist von Interesse, zu bemerken, dass während den Messungen die Beleuchtungskörper ausgeschaltet werden mussten. Sonst standen sie voll im Betrieb, obwohl die mittlere Tageslicht-Beleuchtungsstärke

um 250 Lux schwankte, also einen für die mittelgroße Fabrikation genügenden Wert aufwies. Diese Tatsache entspricht früheren Beobachtungen, gemäß welchen die künstliche Beleuchtung eingeschaltet wird, sobald die Intensität der Tageslichtbeleuchtung unter diejenige der künstlichen Beleuchtung sinkt, die gewissermassen als normal empfunden wird.

Bei überdimensionierter künstlicher Beleuchtung werden deshalb auch grosszügig bemessene Oberlichter ihren Zweck nicht erfüllen. Bei sehr hohem Lichtbedarf ist das Ausnutzen der Tageslichtbeleuchtung überhaupt fragwürdig. Die wirtschaftliche Grenze der Beleuchtung mit Tageslicht dürfte bei etwa 500 bis 600 Lux liegen.

## Zusammenfassung

Es werden Probleme der Tageslichtbeleuchtung bei Industriehallen erörtert, wichtige lichttechnische Grundbegriffe definiert, ein Überblick über die bestehenden Methoden zur Berechnung des Tageslichtkoeffizienten gegeben und eine neue Methode zur Bestimmung des Himmelslichtanteils des Tageslichtkoeffizienten abgeleitet. Die Auswertung für Shedhallen wird gezeigt, wobei die Einflüsse der geometrischen Gegebenheiten auf die Tageslichtbeleuchtung berücksichtigt werden. Ein Vergleich mit durchgeföhrten Lichtmessungen ergibt eine befriedigende Übereinstimmung.

## Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Normen: DIN 5034: Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht. Leitsätze (Ausgabe Nov. 1959).
- [2] Grün, A.: Gutes Licht im Industriebau. «Abhandlungen aus dem Stahlbau» (Sonderdruck). 1953, Heft 14.
- [3] Rossbach, R.: Tageslicht im Industriebau. «Zentralblatt für Industriebau» 6. Jg. (1960) H. 3, S. 103–118; H. 4, S. 159–170.
- [4] Krochmann, J.: Die ausreichende Versorgung von Innenräumen durch Tageslicht. «Zentralblatt für Industriebau» 9. Jg. (1963) Heft 12, S. 575–580.
- [5] Farner, M.: Die Bedeutung der Fensterorientierung bei Industriebauten. Sonderdruck aus «Modernes Bauen», Band 2, Okt./Nov. 1960.
- [6] Schweiz. Beleuchtungs-Kommission: Allgemeine Leitsätze für Beleuchtung. Publikation SEV 4014, 1965.
- [7] Danzeisen, H.: Industriebau in Amerika. «Schweiz. Bauzeitung» 83. Jg. (1965), H. 18, S. 293–303.
- [8] Sonderheft: Tageslicht. «Schweiz. Technische Zeitschrift», 63. Jg. (1966), H. 38/39, S. 785–854.

## Die Bemessung von Trockenbeeten für Klärschlamm

DK 628.336

Von John H. Nebiker, Dr. sc. techn., und Walter Munz, dipl. Ing., EAWAG, Zürich

Heute, da der Absatz von flüssigem Faulschlamm an die Landwirtschaft je länger je weniger gewährleistet werden kann, ist es wohl angebracht, nicht nur die künstlich beschleunigte Trocknung, sondern auch den natürlichen Vorgang auf Trockenbeeten etwas näher zu untersuchen. Zwar sind schon einige Versuche in dieser Richtung unternommen worden. Gerade die wichtigen Einflüsse auf die Verdunstung – die Witterung und der Wassergehalt – wurden aber nicht zusammenwirkend erfasst. Zur Abklärung der sich dabei stellenden Fragen wurden deshalb in der EAWAG einige Versuchsreihen durchgeführt. Für die theoretischen Grundlagen, die Versuchsdurchführung und -ergebnisse sei auf die diesbezügliche Dissertation verwiesen [1]. Hier soll nun versucht werden, die Ergebnisse den Bedürfnissen der Praxis anzupassen.

### 1. Aus der Theorie der Trocknung

In der Trocknungstechnik wird der Verlauf der Trocknung mit einer Kurve dargestellt, die die Verdunstungsintensität  $I_S$  des Trockengutes (hier: Schlamm) in Abhängigkeit von der Schlammfeuchtigkeit  $u$  zeigt. Unter der Feuchtigkeit versteht man dabei das Verhältnis des Wassergewichts zum Trockengewicht der Feststoffe. Der Feststoffgehalt  $f$  hingegen ist definiert als Gewicht Trockensubstanz pro Gesamtgewicht des Schlammes (in Prozent). Die Umrechnung Feststoffgehalt – Feuchtigkeit erfolgt nach den Formeln:

$$u = 100 \left( \frac{100}{f} - 1 \right) \quad \text{und} \quad f = 100 \frac{100}{100 + u}.$$

Um die Einflüsse der wechselnden Umweltbedingungen auszuschalten, kann die Verdunstungsintensität  $I_W$  von reinem Wasser unter den gleichen äusseren Bedingungen (dies wurde bei den bisherigen Versuchen oft vernachlässigt) ebenfalls gemessen werden.

Erst das Verhältnis  $I_S/I_W$ , das als Verdunstungs-Verhältnis  $e$  bezeichnet wird, stellt den Verlauf der Trocknungsintensität in alleiniger Abhängigkeit von der Feuchtigkeit dar. Dieser Verlauf ist in Bild 1 dargestellt. Für den praktischen Gebrauch genügt es, die Kurve im Gebiet des abnehmenden Verdunstungs-Verhältnisses (Abschnitt fallender Trocknungsintensität) durch eine Gerade zu ersetzen, die durch den Koordinatennullpunkt geht. Ihr Schnittpunkt mit der horizontalen Geraden im Abschnitt «konstanter» Trocknungsintensität wird als reduzierter kritischer Punkt  $u_{Kr}$  bezeichnet.

Dass die Trocknung bis zum Punkt  $u_{Kr}$  von der Schlammfeuchtigkeit unabhängig ist, wird erklärt mit dem Umstand, dass die Feuchtigkeit an der Schlammoberfläche in der Hauptsache durch Kapillarkräfte laufend nachgespiesen wird. Die Versuche der EAWAG haben ergeben, dass das Verdunstungs-Verhältnis  $e$  für gut ausgefaulten Schlamm in diesem Abschnitt um 105 % liegt. Die Verdunstung des Schlammwassers geht also schneller vor sich als diejenige an einer freien Wasseroberfläche, was zum Teil auf die dunklere Farbe, die eine grössere Wärmestrahlungsabsorption bewirkt, zurückzuführen ist. Der Punkt  $u_{Kr}$  kennzeichnet den Anfang einer Verzögerung des Feuchtigkeitsnachsches, die durch die allmähliche Austrocknung des Schlammes bedingt ist. Die Verdunstung an der Luft geht zurück, und es treten an der Schlammoberfläche trockene Stellen auf. Die Verdunstungszone zieht sich ins Schlammminnere zurück.

Die Feuchtigkeit beim Punkt  $u_{Kr}$  ist nicht konstant, sondern abhängig von der Schlammtiefe und der Trocknungsintensität, was wegen der Kapillarwirkung verständlich ist. Die Versuche der EAWAG haben folgende Beziehung ergeben:

$$(1) \quad u_{Kr} = 18^{1/2} (I_{S,K} g_{TS})^{1/2} = \sqrt{360 I_W g_{TS}} \quad [\%]$$

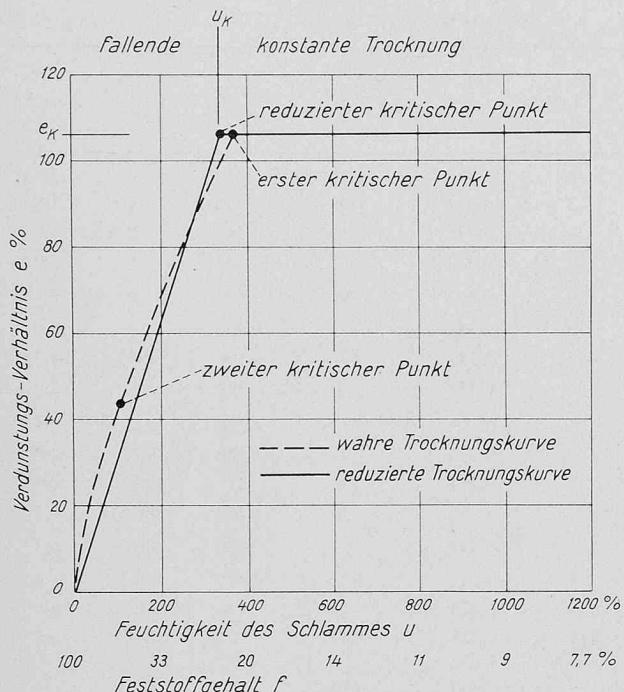


Bild 1. Trocknungskurve für Faulschlamm (nach Coackley)

wobei  $I_{S,K}$  Trocknungsintensität des Schlammes im Abschnitt konstanter Trocknungsintensität  
 $I_w = I_{S,K}/e_K$  Verdunstungsintensität von Wasser  
 $g_{TS}$  Feststoffgewicht pro Flächeneinheit  $[kg/m^2]$   
 $(= G_{TS}/F$  in [1])

Im Abschnitt fallender Trocknungsintensität ist die Intensität von der Schlammfeuchtigkeit abhängig. Die Entfernung des restlichen Wassers wird immer schwieriger, weil sich die Verdunstungszone immer tiefer in die Poren zurückzieht. Die Trocknung eines Schlammes hört bei etwa 10% Feuchtigkeit ( $f = 91\%$ ) auf.

Mittels der reduzierten Trocknungskurve kann die Trocknungsduer  $t$  [Tage] berechnet werden. Diese Gleichung setzt sich entsprechend den beiden Abschnitten aus zwei Teilen zusammen:

$$(2) \quad t = 0,3 \frac{g_{TS}}{I_w} \left( \underbrace{u_a - u_{Kr}}_{\text{Abschnitt konstanter}} + \underbrace{2,3 u_{Kr} \log \frac{u_{Kr}}{u_e}}_{\text{fallender Trocknung}} \right)$$

wobei  $u_a$  Anfangsfeuchtigkeit

$u_e$  Endfeuchtigkeit

Wenn die Trocknung nicht über  $u_{Kr}$  hinausgeht, so fällt natürlich das zweite Glied (fallende Trocknung) weg. Setzt sie erst nach  $u_{Kr}$  ein, so fällt  $u_a - u_{Kr}$  weg, wobei im verbleibenden Ausdruck  $\log u_a/u_e$  anstelle von  $\log u_{Kr}/u_e$  tritt.

## 2. Anpassungen an die Praxis

Diese Gleichungen sind für die reine Trocknung entwickelt worden (keine Versickerung und ohne Niederschläge). Für die Anwendung in der Praxis müssen deshalb einige Anpassungen vorgenommen werden. Aus der Literatur geht hervor, dass die Versickerung hauptsächlich in den ersten Tagen nach dem Einbringen in das Beet stattfindet. Dabei wird im Mittel ein Feststoffgehalt von  $f = 25\%$  ( $u = 300\%$ ) erreicht [2]. Dieser Wert darf bei Sickerbeeten als Anfangsfeuchtigkeit  $u_a$  eingesetzt werden.

Die Niederschläge sind für die Berechnung der Trocknungsduer von wesentlicher Bedeutung. Ihre Wirkung wird jedoch verschieden ausfallen, je nachdem, ob sie am Anfang oder am Ende der Trocknungsduer fallen. Regen, der am Anfang der Trocknungszeit niedergeht, wird zusammen mit dem Schlammwasser versickern oder verdunsten. Der gegen das Ende der Trocknungsperiode fallende

Tabelle 1. Verdunstungswerte in mm/Monat

		Verdunstungsintensität (überdecktes Beet)		Niederschläge aus Annalen		Verdunstungsintensität (offenes Beet)
		aus Annalen	korrigiert	N	N/4	
Zürich	Sommer	75	1,2	90	72	62
	Winter	27	0,8	22	17	7
Lugano	Sommer	109	1,2	131	105	89
	Winter	53	0,8	42	34	17

1)  $I_w$  wird bei offenem Beet zur Berechnung von  $u_{Kr}$  benötigt.

2)  $I_w^* = 0,8 I_w$ ; wird bei Beet mit Dach zur Berechnung von  $u_{Kr}$  und  $t$  benötigt.

3)  $I_w^* = I_w - N/4$ ; wird bei offenem Beet zur Berechnung von  $t$  benötigt.

Regen wird durch die Risse im Schlamm direkt ins Filterbeet gelangen und schnell versickern. Zwischen diesen extremen Zuständen saugt der Schlamm natürlich einen Teil der Niederschläge auf, der nur durch Verdunstung entfernt werden kann. Überschlägig kann angenommen werden, dass etwa 25% der Niederschläge während der Trocknungsperiode verdunsten, das heißt es ist ein Viertel der monatlichen Niederschlagshöhe von der monatlichen Verdunstungshöhe abzuziehen.

Bei überdeckten Trockenbeeten muss der Einfluss der Niederschläge nicht berücksichtigt werden. Die Versuche haben ergeben, dass eine Überdeckung aus lichtdurchlässigem Material (z.B. Fiberglas) eine leichte Verminderung der Trocknungsintensität zur Folge hat, da die Windzufluss an der Schlammoberfläche etwas behindert wird. Diese Reduktion dürfte unter einem Dach (3 bis 4 m über Terrain) mit offenen Seiten rund 20% betragen [1, S. 317].

## 3. Berechnungsbeispiele

Die praktische Anwendung dieser Überlegungen soll nun an an einem Beispiel mit folgenden Varianten erläutert werden:

drei Beettypen mit je 1 bis 4 Fülltiefen, nämlich

- ein offenes Trockenbeet mit Versickerung (Sandfilterschicht),
- ein überdecktes Trockenbeet mit Versickerung (Sandfilterschicht)
- ein überdecktes Trockenbeet mit dichtem Boden (ohne Versickerung)

und zwei klimatisch verschiedene Beobachtungsstationen der Schweiz. Meteorologischen Zentralanstalt: Zürich und Pregassona bei Lugano.

Für unseren Zweck betrachten wir die Witterung für die Winter- und Sommerverhältnisse getrennt (Mitte März/Mitte September). Bei der Auswertung der Angaben aus den Annalen der Schweiz Meteorologischen Zentralanstalt (Mittel 1954–61) ist noch folgender Umstand zu beachten. Die Verdunstungsmessungen wurden mit einer Wildschen Waage vorgenommen, die nur  $250 \text{ cm}^2$  Wasser-oberfläche aufweist und 2 m über Boden in einer offenen Hütte steht. Ihre Anwendung auf die Verhältnisse bei Trockenbeeten erfordert einen Korrekturfaktor, der nach unseren Versuchen [1, S. 322] zu etwa 0,8 für den Winter und 1,2 für den Sommer angenommen werden kann. Die Bestimmung der kritischen Feuchtigkeit  $u_{Kr}$  erfolgt auch bei offenen Beeten ohne Berücksichtigung der Niederschläge. In Tabelle 1 sind die für die Berechnung nötigen Verdunstungswerte zusammengestellt. Daraus können die erforderlichen Trocknungsduern  $t$  berechnet werden. Das geschah unter folgenden Annahmen:

Feststoffgehalt

Anfang: überdeckte Beete  $f_a = 8\%$  ( $u_a = 1150\%$ )

offene Beete (nach Versickerung)  $20\%$   $400\%$

Ende:  $35\%$   $186\%$

Feststoffgewicht pro  $m^2$ :  $g_{TS} = 8 \text{ kg/m}^2$  pro 10cm Fülltiefe ( $f_0 = 8\%$ ).

Die Berechnung von  $t$  ist in Tabelle 2 zusammengestellt, wobei folgende Kurzbezeichnungen verwendet wurden:

Sandbett, ohne Dach 5 cm Füllhöhe:  $S_{05}$

Sandbett, ohne Dach 10 cm Füllhöhe:  $S_1$

Sandbett, ohne Dach 20 cm Füllhöhe:  $S_2$

Sandbett, ohne Dach 30 cm Füllhöhe:  $S_3$

Tabelle 2. Berechnung der erforderlichen Trocknungsdauer

Ort Zeit	$g_{TS}$ kg/m <sup>2</sup>	$I_W, I_W^*$ für $u_{Kr}$ mm		$u_{Kr}$ %	$u_a$ %	$I_W^*$ mm	$\frac{0,3 \cdot g_{TS}}{I_W^*}$	$U_{konst}$ $u_a - u_{kr.}$ %	$\log \frac{u_{Kr.a}}{u_e}$	$U_{fall}$ %	$U_{tot}$ %	$t$ Tage	$n =$ $\frac{t_{vorh.}}{t+3}$
		$u_{Kr}$ %	$u_a$ %										
Zürich Sommer	$S_{05}$	4	90	360 < 400		62	0,020	40	0,287	240	280	6	20
	$S_1$	8	90	510 > 400		62	0,039	—	0,333	390	390	15	10
	$S_2$	16	90	720 > 400		62	0,077	—	0,333	550	550	42	4,0
	$S_3$	24	90	880 > 400		62	0,116	—	0,333	675	675	78	2,2
	$D_2$	16	72	645 > 400		72	0,067	—	0,333	495	495	33	5,0
	$d_{05}$	4	72	320 < 1150		72	0,017	830	0,236	175	1005	17	9,0
	$d_1$	8	72	455 < 1150		72	0,033	695	0,387	405	1100	36	4,7
	$d_2$	16	72	645 < 1150		72	0,067	505	0,539	800	1305	87	2,0
Zürich Winter	$S_{05}$	4	22	180 < 400		7	0,170	220	0	0	220	37	2,3
	$S_1$	8	22	250 < 400		7	0,340	150	0,127	73	220	75	1,2
	$S_2$	16	22	355 < 400		7	0,680	45	0,281	230	275	190	0,5
	$S_3$	24	22	430 > 400		7	1,02	—	0,333	330	330	340	0,3
	$D_2$	16	17	315 < 400		17	0,282	835	0,228	165	1000	280	0,3
	$d_{05}$	4	17	155 < 1150		17	0,070	995	0	0	995	70	1,2
	$d_1$	8	17	220 < 1150		17	0,141	930	0,072	37	970	140	0,6
	$d_2$	16	17	315 < 1150		17	0,282	835	0,228	165	1000	280	0,3
Lugano Sommer	$S_1$	8	131	615 > 400		89	0,027	—	0,333	470	470	14	11
	$S_2$	16	131	870 > 400		89	0,054	—	0,333	665	665	36	4,7
	$D_2$	16	105	780 > 400		105	0,046	—	0,333	600	600	28	5,9
	$d_1$	8	105	550 < 1150		105	0,023	600	0,471	595	1195	28	5,9
	$d_2$	16	105	780 < 1150		105	0,046	370	0,622	1115	1485	68	2,6
Lugano Winter	$S_1$	8	42	350 < 400		17	0,141	50	0,274	220	270	38	3,0
	$S_2$	16	42	490 > 400		17	0,282	—	0,333	375	375	106	1,1
	$D_2$	16	34	440 > 400		34	0,141	—	0,333	340	340	48	2,4
	$d_1$	8	34	310 < 1150		34	0,070	840	0,220	155	995	70	1,7
	$d_2$	16	34	440 < 1150		34	0,141	710	0,375	380	1090	153	0,8

Sandbett, mit Dach      20 cm Füllhöhe:  $D_2$   
dichter Boden, mit Dach    5 cm Füllhöhe:  $d_{05}$   
dichter Boden, mit Dach    10 cm Füllhöhe:  $d_1$   
dichter Boden, mit Dach    20 cm Füllhöhe:  $d_2$

Aus der Trocknungsdauer ergibt sich die Zahl der jährlich möglichen Füllungen  $n$  unter Berücksichtigung der Frostmonate (Zürich 3, Pregassona 2 Monate), während denen keine Entwässerung stattfindet.

Dabei sind zur eigentlichen Trocknungsdauer  $t$  noch etwa 3 Tage für Räumung, Füllung und Versickerung dazuzuschlagen. Die Anzahl Füllungen ist jedoch noch nicht genügend, um die Leistung der Trockenbeete zu beurteilen. Erst die Entwässerungskosten, die zum Beispiel pro Tonne Feststoff angegeben werden können, geben eine gute Vergleichsgrundlage. Zu diesem Zwecke wurden die Kosten für die drei Bauarten der Trockenbeete für schweizerische Verhältnisse geschätzt. Als Beispiel diente eine Beetfläche von 1000 m<sup>2</sup> bei gutem

Tabelle 3. Kosten von Trockenbeeten

Ort	Bauart	Dach	Füll- höhe	jährliche Anzahl Füllungen $n$	jährliche Feststoff- belastung $n \cdot g_{TS}$ kg/m <sup>2</sup>	jährliche Kosten in Fr./m <sup>2</sup> Nutzfläche					Vergleichs- kosten in Fr. pro t Feststoffe	
						amortis. zu 5 %						
						Land	Bau	Unter- halt	Betrieb	Total		
Zürich	Sand	ohne	5	$S_{05}$	22	88	2.50	3.05	—.20	11.—	16.75	19.—
		ohne	10	$S_1$	11,2	90	2.50	3.10	—.20	5.60	11.40	12.70
		ohne	20	$S_2$	4,5	72	2.50	3.20	—.20	2.25	8.15	11.30
		ohne	30	$S_3$	2,5	60	2.50	3.35	—.20	1.25	7.30	12.20
	dicht	mit	20	$D_2$	5,3	85	2.50	6.05	—.70	2.65	11.90	14.—
		dicht	5	$d_{05}$	10	40	2.50	4.90	—.70	1.—	9.10	22.70
		dicht	10	$d_1$	6,3	42	2.50	4.95	—.70	—.65	8.75	20.80
		dicht	20	$d_2$	2,3	37	2.50	5.05	—.70	—.25	8.50	23.—
Lugano	Sand	ohne	10	$S_1$	14	112	2.50	3.10	—.20	7.—	12.80	11.40
		ohne	20	$S_2$	5,8	93	2.50	3.20	—.20	2.90	8.80	9.50
	dicht	mit	20	$D_2$	8,3	133	2.50	6.05	—.70	4.15	13.40	10.10
		dicht	10	$d_1$	7,6	61	2.50	4.95	—.70	—.75	8.90	14.60
		dicht	20	$d_2$	3,4	55	2.50	5.05	—.70	—.35	8.60	15.60

10.— Fr. pro Tonne Feststoff = —.70 Fr. pro m<sup>3</sup> Schlamm zu 93% Wassergehalt  
= —.31 Fr. pro E zu 85 g TS/ET (= 31 kg/EJ).

Baugrund in der Nähe des Faulraumes. Für die Kostenberechnung der überdeckten Trockenbeete wurde ein Fiberglasdach auf leichtem Stahlgerüst gewählt. Die Unterhaltskosten dürften sich im wesentlichen auf das Erneuern des Anstriches der Stahlkonstruktion beschränken. Als Betriebskosten sind die Aufwendungen für das Ausräumen und den Abtransport (hier nicht eingerechnet) des Schlammes einzusetzen samt gelegentlicher Erneuerung der Sandunterlage. Die Amortisation der Erstellungskosten und die Betriebskosten pro t Feststoffe sind in Tabelle 3 zusammengestellt.) Daraus geht deutlich hervor, dass die Versickerung auf keinen Fall weggelassen werden sollte. Überdeckte Beete sind etwas weniger wirtschaftlich als offene.

#### 4. Schlussfolgerungen

Die Durchrechnung der oben genannten Beispiele zeigt, dass es mit geringem Rechenaufwand möglich ist, bei der Dimensionierung von

Trockenbeeten verschiedene Einflüsse wie Witterung, Feststoffgehalt, Überdeckung und Fülltiefe zu berücksichtigen. Obschon dabei verschiedene Annahmen gemacht werden müssen, glauben wir, dass die vorliegende Methode eine brauchbare Grundlage zur Beurteilung von Trockenbeeten darstellt.

#### Literatur

- [1] Nebiker, John H., Die Trocknung des Klärschlammes durch Verdunstung, «Schweiz. Z. Hydrologie», 1965/2.
- [2] Jeffry, E., Dewatering Rates for Digested Sludge in Lagoons «Jour. Water Poll. Control», 32, 1153 (1960).

Adressen der Autoren: John H. Nebiker, Dr. sc. techn., 950 N. Pleasant Street Apt. 59, Amherst Mass. 01002 (USA). Walter Munz, dipl. Ing. ETH, EAWAG, Physikstr. 5, 8044 Zürich.

DK 624.131.473

## Die Facetten-Methode

Ein Verfahren für elektronische Massenberechnungen in beliebigem Gelände

Von Peter Benz, dipl. Bau-Ing., Bern

Die hier beschriebene Facetten-Methode stammt vom Verfasser, der sie im Jahre 1963 bei der Bauabrechnung der Zentrale Schiffen entwickelt und erstmalig angewandt hat. Die grundlegende Idee der Facetten-Einteilung erscheint so naheliegend, dass sie möglicherweise auch schon von andern Ingenieuren angewandt wurde, unter Umständen bloss für einen Teil einer Massen-Ermittlung. Die konsequente Anwendung des Verfahrens für eine umfangreiche Gelände-Veränderung würde nämlich von Hand einen derartigen Zeitaufwand erfordern, dass sie praktisch undurchführbar ist; nur der Einsatz eines Computers erlaubt einen wirtschaftlich tragbaren Einsatz der Methode. Da auch für IBM – welche damals die Programmierung gemäss den Instruktionen des Verfassers durchführte – das Verfahren unbekannt war, darf angenommen werden, dass es sich um eine absolut neuartige Methode handelt.

Red.

#### 1. Einleitung

Unter dem Begriff «Facetten-Methode» wird im folgenden ein Verfahren beschrieben, welches erlaubt, im Bauwesen häufig auftretende Massenberechnungen grösseren Umfangs auf einfache Weise mit Computern auszuführen. Die Methode kann z. B. bei folgenden Berechnungen angewandt werden:

- Aushubkubaturen für ausgedehnte Platten- und Einzel-Fundationen
- Kubaturen von Einschnitten oder Aufschüttungen im Strassenbau
- Gelände-Oberfläche für Humusierung
- Fels-Oberflächen für Positionen wie: waschen und reinigen oder Mörtelauftrag vor dem Betonieren und dergleichen mehr.

Die Facetten-Methode erfordert keinerlei Spezialkenntnisse, sondern kann mit Leichtigkeit von jedermann angewandt werden, der einen kotierten Grundrissplan zu lesen versteht. Sie wird deshalb vor allem den Praktiker interessieren, der bisher Massenberechnungen nach den nachfolgend kurz beschriebenen «Herkömmlichen Methoden» (Querschnittsmethode und Horizontalschnittsmethode) ausgeführt hat, und weniger den Spezialisten, welcher derartige Aufgaben mittels Photogrammetrie, Integratoren und Computern löst.

#### 2. Herkömmliche Methoden zur Massenberechnung

A. Die Querschnittsmethode wird meistens bei langen, relativ schmalen Gelände-Veränderungen angewandt, z. B. im Strassen- und Pisten-Bau. Rechtwinklig zu einer vorgegebenen Achse werden in bekannten, nicht unbedingt gleichmässigen Abständen Querprofile des ursprünglichen Geländes aufgenommen, der neue Zustand eingezeichnet und die Abtrags- oder Aufschüttungsfläche planimetriert. Zur Volumenberechnung wird die Fläche zweier benachbarter Profile gemittelt und mit dem Abstand der Profile multipliziert. Der Vorteil dieser Methode liegt im geringen Arbeitsaufwand. Als Nachteil ist aufzuführen, dass der tatsächliche Verlauf des Geländes zwischen den Profilen nicht erfasst wird.

B. Die Horizontalschnittsmethode wird häufig bei etwa gleich langen wie breiten Gelände-Veränderungen angewandt, z. B. beim Baugruben-Aushub. In einem Niveaulinien-Plan des ursprünglichen Geländes zeichnet man nach dem Aushub die neuen Niveaulinien ein,

planimetriert die Flächen, die von je einer ursprünglichen und einer neuen Niveaulinie gleicher Höhe umschlossen werden, mittelt benachbarte Flächen und multipliziert mit der Höhendifferenz. Diese Methode zeichnet sich durch gute Genauigkeit aus, besonders wenn die Niveaulinien durch eine Messstisch-Aufnahme im Gelände ermittelt werden (und nicht im Büro anhand eines kotierten Grundrissplanes «nach Gefühl» gezeichnet!). Ihr Nachteil liegt im beträchtlichen Arbeits-Aufwand.

C. Vergleich der beiden Methoden. Grundsätzlich besteht zwischen der Querschnitts-Methode und der Horizontalschnitts-Methode kein Unterschied, ausser dass die Bezugsebenen um 90° gegeneinander verdreht sind. Werden bei der Querschnitts-Methode die Profil-Abstände so klein gewählt wie bei der Horizontalschnitts-Methode die Abstände der Niveaulinien, dann ist die Genauigkeit der Querschnitts-Methode genau so gut – und der Arbeitsaufwand genau so gross.

#### 3. Theorie der Facetten-Methode

##### A. Die grundlegende Idee

Die Schwierigkeiten für eine einfache und dennoch akkurate Massenberechnung liegen offensichtlich in der meist unregelmässigen Form des natürlichen Geländes, die man mit Querschnitten nur annähert und mit Horizontalschnitten nur mit grossem Arbeitsaufwand erfassen kann. Der Grund hierfür ist, dass ein ebener Schnitt durch einen beliebigen und unregelmässigen räumlichen Körper über diesen keine typische Aussage macht, da ja ein benachbarter Schnitt eine ganz andere Form haben kann.

Die Idee der Facetten-Methode liegt darin, den gesamten räumlichen Verlauf des Geländes zu erfassen, indem man die unregelmässige Oberfläche durch eine Facetten-Fläche ersetzt – gebildet aus einer Vielzahl von Dreiecksflächen – die sich dem Gelände bestmöglich anschmiegt, wie das in Bild 1 angedeutet ist.

Ähnlich wie das natürliche Gelände kann man selbstverständlich auch die Geländeform nach erfolgtem Aushub oder Aufschüttung durch eine Facetten-Fläche ersetzen. Da man in den meisten Fällen ebene Flächen<sup>1)</sup> anstrebt, wird die Facetten-Einteilung besonders einfach (Bild 2). Hat man diese Facetten-Flächen gefunden, d. h. kennt man die Koordinaten und Koten der Eckpunkte aller Dreiecke und weiß man, welche Punkte jeweils zusammen ein Dreieck bilden, dann hat man das Gelände mathematisch erfasst und die Massen-«Berechnung» ist nun tatsächlich bloss noch eine schematische Rechenarbeit, die man durch Computer ausführen lässt.

##### B. Berechnung der Gelände-Oberfläche

Um in einem fest umgrenzten Gebiet die tatsächliche Geländeoberfläche zu bestimmen, muss die Summe aller Dreiecke der Facettenfläche innerhalb dieser Umgrenzung berechnet werden. Greifen wir ein beliebiges Dreieck heraus: die Eckpunkte seien

<sup>1)</sup> Der Ausdruck «ebene Fläche» ist im mathematischen Sinn als eine zweidimensional lineare Fläche zu verstehen, die beliebig geneigt sein kann. Eine «ebene Fläche» kann, braucht aber nicht unbedingt eine «horizontale Fläche» sein.