631.6:624.132:631.153.46

MEDEDELINGEN LANDBOUWHOGESCHOOL
WAGENINGEN • NEDERLAND • 73-10 (1973)

ANALYSE EN KOSTENMINIMALISERING VAN GRONDVERZET

ANALYSIS AND COST MINIMIZATION OF MOVEMENT OF EARTH

A. W. MIJNLIEFF

Government Service for Land and Water Use,
Utrecht, The Netherlands

(Received 3-IV-1973)

H. VEENMAN & ZONEN B.V. – WAGENINGEN – 1973

204 8537

Communications Agricultural University Wageningen 73-10 (1973).
(is also published as a thesis)

INHOUD

1. INLEIDING 1
   1.1. Algemeen 1
   1.2. Kostenberekeningen van grondverzet 2

2. MINIMALISERING VAN DE KOSTEN VAN GRONDVERZET. 6

3. KOSTENBEREKENING VAN GRONDVERZET 12
   3.1. Bepaling van hoeveelheden en van transportplan. 12
   3.1.1. Hoeveelheden 12
   3.1.2. Transportplan 13
   3.2. Berekening van machineprestaties. 15
   3.2.1. Droog grondverzet 16
   3.2.1.1. Graafmachine 17
   3.2.1.2. Graafmachine met transportmiddelen 19
   3.2.1.3. Zelfladende, transporterende en lossende graafmachines 23
   3.2.2. Hydraulisch grondverzet 27

4. TOEPASSING VAN KOSTENMINIMALISERING EN OPTIMALE MACHINEKEUZE 32
   4.1. Beschrijving van het uit te voeren werk 32
   4.2. Plan voor droog grondverzet 32
   4.2.1. Voorwaarden 32
   4.2.2. Grondbalans. 35
   4.2.3. Transportplan 35
   4.2.4. Werkindeling 40
   4.3. Plan voor hydraulisch grondverzet 42
   4.4. Machines en werkomstandigheden 44
   4.5. Resultaten. 48
   4.5.1. Droog grondverzet 48
   4.5.2. Hydraulisch grondverzet 55

5. SAMENVATTING EN CONCLUSIES 64

6. SUMMARY 68

7. GEBRUIKTE SYMBOLEN 71

8. LITERATUUR 76

1. INLEIDING

1.1. ALGEMEEN

Bij de realisering van vele civieltechnische en cultuurtechnische projecten vormt het grondverzet zowel een belangrijk onderdeel in het te verrichten werk als in de kosten. Deze projecten omvatten o.a. de aanleg of verbetering van wegen en waterlopen en de inrichting of herinrichting van terreinen, gelegen tussen wegen en waterlopen (kavelinrichting). Zo werd in Nederland in 1970 door de Cultuurtechnische Dienst rond f 120 miljoen besteed aan grondverzet in het kader van de uitvoering van waterbeheersings-, ontsluitings- en kavelinrichtingswerken. Hierbij was bijna 20 miljoen m^3 grond betrokken.

Voor het grondverzet worden in Nederland hoofdzakelijk machines gebruikt. Afhankelijk van de hoeveelheid te verplaatsen grond en de afstand en richting van de verplaatsing, wordt een keuze gemaakt uit machines die de gehele verplaatsing verzorgen en uit combinaties van gespecialiseerde machines die ieder afzonderlijk een gedeelte van de verplaatsing voor hun rekening nemen. Voorbeelden van de eerste categorie zijn bulldozers en scrapers, van de tweede categorie draglines die in combinatie werken met dumpers.

Ter beoordeling van de kosten van een werk wordt een begroting opgesteld. De grondslag van de begroting wordt gevormd door het plan van het uit te voeren werk, waarin de aard en omvang van de werkzaamheden en de eisen, die aan het eindresultaat worden gesteld, zijn aangegeven. Zo wordt voor de begroting van het grondverzet uitgegaan van een plan, waarin de plaatsen en de hoeveelheden van de te ontgraven en de op te brengen grond zijn aangegeven. De transportafstanden waarover de grond moet worden verplaatst worden in een aantal afstandsklassen ingedeeld. Op basis van deze indeling en de eisen die aan het eindresultaat worden gesteld wordt een keuze gemaakt uit de machines of machine-combinaties die voor dit werk in principe in aanmerking komen. Bij deze keuze spelen de werkomstandigheden een rol, omdat zij de prestatie per tijdseenheid van de machines kunnen beïnvloeden. Genoemd kunnen worden grondsoort, terreinsituatie en weersomstandigheden kort vóór en tijdens de periode van uitvoering. Tevens worden het aantal plaatsen, waar gelijkgerichte werkzaamheden moeten worden verricht (organisatorisch aspect) en de schade die eventueel door het in te zetten machinepark kan worden veroorzaakt, in de beschouwing betrokken.

Een ander aspect bij het opstellen van de begroting is de termijn die voor de uitvoering van het werk wordt gesteld. Deze tijdsfaktor kan aanleiding geven tot het inzetten van meer en/of andere machines, eventueel tegen hogere kosten per tijdseenheid en per m^3 te verplaatsen grond, om zodoende de gestelde termijn niet te overschrijden.

In het onderhavige onderzoek worden de minimale kosten voor de uitvoering van het grondverzet bepaald. Hierbij wordt uitgegaan van een gestelde termijn waarbinnen het werk gereed moet zijn en van een aantal typen machines die in

principe in aanmerking komen om het werk uit te voeren. Daarnaast wordt nagegaan hoe de minimale kosten voor het werk en het hierbij behorende machinepark worden beïnvloed door een verandering van de gestelde termijn en door de omstandigheden die tijdens de uitvoering van het werk kunnen optreden. Als voorbeeld voor de berekening van de minimale kosten en van de keuze van de machines, die in een werk moeten worden ingezet, wordt het overwegend horizontaal grondverzet gekozen zoals dit bij kavelinrichtingswerken in een ruilverkaveling veel voorkomt.

Na een korte beschrijving van een aantal inrichtingsplannen waarbij o.a. de grondbalans en het transportplan een rol spelen wordt daarna een wiskundig model opgesteld dat de grondslag vormt voor de kostenberekening (hoofdstuk 2).

De berekeningen van de te verplaatsen hoeveelheid grond en het opstellen van een transportplan worden in deel 3.1 toegelicht. Deel 3.2 is gewijd aan een analyse van de werkhandelingen van grondverzetmachines, waarbij onderscheid is gemaakt in machines voor het 'droge grondverzet' (b.v. bulldozers, draglines, dumpers) en het 'hydraulisch grondverzet' (b.v. winzuiger met persleiding).

Als rekenvoorbeeld wordt in hoofdstuk 4 een kavelinrichtingsplan behandeld, waarin een aantal sloten wordt gedempt en enige percelen worden geëgaliseerd. De hoeveelheden te verplaatsen grond en de plaatsen waar grond moet worden ontgraven en gestort worden als vaststaand beschouwd. Het kavelinrichtingsplan voor het hydraulisch grondverzet heeft eenzelfde perceelsindeling als het plan voor het droge grondverzet; de grondbalans en het transportplan van de plannen zijn echter verschillend, omdat deze worden afgestemd op de gekozen werkmethode. Tenslotte worden de resultaten van de kostenberekeningen voor de uitvoering van de plannen behandeld.

1.2. Kostenberekeningen van grondverzet

Bij het opstellen van plannen voor de inrichting of herinrichting van gebieden moet, na het vaststellen van het toekomstig hoofdstramien van wegen, waterlopen, landschapselementen e.d. een verdere indeling van het door het hoofdstramien omsloten gebied worden ontworpen. Hiertoe worden kavelinrichtingsplannen opgesteld. Voorbeelden van dergelijke inrichtingsplannen zijn te vinden in ruilverkavelingsrapporten.

Voor de inrichting van ruilverkavelingsgebieden worden in de meeste gevallen een aantal alternatieve kavelinrichtingsplannen ontworpen. Om een keuze uit de alternatieve plannen te maken, een keuze die veelal is gebaseerd op een economisch toetsingscriterium, dienen o.a. de kosten van de verschillende plannen te worden berekend.

Omdat de kosten van het grondverzet bij de kavelinrichtingswerken een belangrijk onderdeel vormen van de gehele begroting voor deze werken, spitsen de kostenberekeningen voor de alternatieve plannen zich toe op de berekening van de kosten voor het eigenlijke grondverzet.

De kostenbegroting voor het grondverzet omvat in grote lijnen de volgende onderdelen.

- kosten voor materiaal-aankoop
- transport van het materiaal naar en op het werk
- kosten van de uitvoering
  a. het vrijmaken van het werkterrein: b.v. het opruimen van afscheidingen etc., maar ook de schadevergoeding om het werk te mogen en kunnen uitvoeren (schade voor gederfde productie)
  b. voorbereidende werkzaamheden als b.v. uitzetten en ritsen
  c. aan- en afvoer en transport op het werk van het werktuigenpark
  d. het grondverzet
  e. de werkzaamheden, die nodig zijn om het werk aan de gang te houden: b.v. onderhoud rijbanen, drooghouden van het werkterrein
  f. het afwerken en herstellen van het terrein: b.v. inzaaien, oppervlakte egaliseren, woelen etc.
- schadevergoedingen ten gevolge van de uitvoering van het werk, b.v. structuurbederf en rijsporen. Deze post kan soms door herstelwerkzaamheden binnen de termijn van oplevering worden voorkomen
- algemene voorzieningen voor het werk (directie- en schaftketen, opslagruimte, klein materieel)
- overhead-kosten
- belastingen.

De alternatieve kavelinrichtingsplannen kunnen worden ingedeeld naar gelang de verschillende onderdelen van het plan variëren zoals bijvoorbeeld het wegen- en waterlopenstramien, de kavelindeling en het grondverzet.

Zo ontwierpen OOSTRA (1962) en SOL (1962) voor de ruilverkaveling 'Lollebeek' (L), VAN DUIN e.a. (1960) voor de ruilverkaveling 'Raamsdonk' (N.B.), BOS e.a. (1962) voor de ruilverkaveling 'Stoppeldijk' (Zld.) en KRIJGER en WEMMENHOVEN (1960) voor de ruilverkaveling 'Grootslag' (N.H.) een aantal alternatieve plannen, waarbij zowel het stramien van wegen en waterlopen als de kavelindeling per plan verschillend zijn. Alternatieve kavel- en perceelsindelingsplannen, waarbij het wegen- en waterlopenplan niet wordt gewijzigd, zijn beschreven door LAMBRECHTS en DIELEMAN (1959) voor de ruilverkaveling 'Tielerwaard' (Gld.), VAN DUIN en BALLEGOOYEN (1959) voor de ruilverkaveling 'Heusden en Altena' (N.B.), BIJKERK (1959) voor de ruilverkaveling 'Nijeveen-Kolderveen' (Dr.) en KESTER en SPRIK (1972) voor het Fries-Groningse kleimozaïekgebied. De invloed van de grootte van het grondverzet op het uiteindelijke resultaat is voor een indelingsplan in de herverkaveling 'Zak van Zuid-Beveland' (Zld.) door OOSTRA (1959) uitgewerkt. Hierbij werden bij een gegeven wegen-, waterlopen- en indelingsplan alternatieve hoogteliggingen van het maaiveld in beschouwing genomen. De kostenberekeningen voor het grondverzet zijn gebaseerd op een kaart waarop de plaatsen en de hoeveelheden zijn aangegeven waar grond moet worden ontgraven en aangebracht. Deze kaart wordt afgeleid van het inrichtingsplan. In het algemeen wordt getracht in het kader van het plan de hoeveelheid te ontgraven en aan te brengen grond met elkaar in evenwicht te brengen (gesloten grondbalans). Op basis van de grondbalans wordt een transportplan voor het grondverzet opgesteld waarin de hoeveelhe-

den, de herkomst en de bestemming van de grond zijn aangegeven. Aan de hand van deze gegevens worden de uitvoeringsmethoden gekozen en een prijs per kubieke meter te verzetten grond per werkmethode vastgesteld, de zogenoemde eenheidsprijzen. De eenheidsprijzen kunnen voor een aantal werkzaamheden ook worden uitgedrukt in kosten per m^1 of per m^2. Bij het vaststellen van deze eenheidsprijzen wordt rekening gehouden met de kenmerken van het gebied (o.a. topografie, draagkracht en verwerkbaarheid van de grondsoort), de spreiding van het werk over het gebied en de periode waarin het werk wordt uitgevoerd.

In tabel 1 is een voorbeeld gegeven van een transportplan voor de ruilverkaveling 'Amerkant' (N.B.) (VAN DUIN en EELKEMA, 1962). In deze tabel zijn tevens de gebruikte, toen geldende, eenheidsprijzen opgenomen. Aan de hand van de in tabel 1 genoemde eenheidsprijzen kan worden bepaald of 'werk met werk' kan worden gemaakt. Bijvoorbeeld het graven van een nieuwe en het dempen van een bestaande sloot op een afstand van 200 m van de nieuwe sloot. Hierbij kan de grond respectievelijk ter plaatse worden gewonnen en verwerkt voor een bedrag van f 2,82/m^3 (f 1,25 + f 1,57) of direct worden afgevoerd uit de nieuwe sloot naar de te dempen sloot, hetgeen f 3,15/m^3 kost. Hieruit blijkt, dat het 'werk met werk' maken in dit geval niet de voorkeur verdient gezien de transportafstand en de aard van de grondwinning. Zou op basis van de eenheidsprijzen geconcludeerd worden, dat 'werk met werk' maken wel in aanmerking kan komen, dan dient een nieuw plan te worden ontworpen waarbij dit facet in het plan en dientengevolge in de grondbalans en het transportplan wordt gebracht.

Om met behulp van een economisch toetsingscriterium een keuze te maken uit een aantal alternatieve plannen dienen o.a. de berekende kosten voor deze plannen onderling vergelijkbaar te zijn. Omdat de kosten afhankelijk zijn van de keuze van het type en aantal in te zetten machines, een keuze die op praktijkervaring is gebaseerd, is het mogelijk dat de kosten van de verschillende plannen niet vergelijkbaar zijn.

In het onderhavige onderzoek wordt nagegaan hoe de minimale kosten voor het grondverzet in een kavelinrichtingsplan kunnen worden berekend. Bij de resultaten van deze berekeningen wordt het machinepark aangegeven, dat voor deze kosten het werk kan uitvoeren. De berekeningen worden uitgevoerd voor een kavelinrichtingsplan (grondbalans bekend) waarvoor een transportplan wordt opgesteld. Voor de uitvoering van dit transportplan met het droge grondverzet wordt een aantal machines of machinecombinaties in beschouwing genomen die in principe ieder afzonderlijk het werk kunnen uitvoeren. Per machine of machinecombinatie worden de uitvoeringskosten van de onderdelen van het transportplan berekend. Door een minimaliseringsproces wordt een zodanige selectie uit de uitvoeringskosten per onderdeel van het transportplan gemaakt dat de totale kosten voor het gehele werk minimaal zijn. Omdat er voorshands geen procedure beschikbaar is waarmee de minimale kosten van een grondverzetsplan kunnen worden bepaald in afhankelijkheid van de kosten en prestaties van het in te zetten materieel en het minimale – aan de machines aangepaste – grondverzet (afstand en hoeveelheid) moesten de genoemde facetten afzonderlijk worden behandeld. In een aantal gevallen zijn ingrepen toegepast om het

cijfermateriaal binnen de perken te houden. Dit geldt vooral voor het transportplan.

Voor de uitvoering van het kavelinrichtingswerk met het hydraulisch grondverzet wordt in dit onderzoek uitgegaan van een plan, dat eenzelfde perceelsindeling heeft als het plan voor het droge grondverzet. Omdat bij het hydraulisch grondverzet de grond centraal wordt gewonnen, wijkt het plan voor wat betreft de grondbalans en het transportplan af van het plan dat met het droge grondverzet wordt uitgevoerd.

Gezien de orde van grootte van het grondverzet in het kavelinrichtingsplan zoals dit in het rekenvoorbeeld zal worden behandeld, is in tegenstelling tot het droge grondverzet hier gesteld dat het werk door één machine of machinecombinatie (zuiger eventueel gecombineerd met een tussenstation) wordt uitgevoerd. Dit houdt in, dat het hierna te ontwikkelen wiskundig model voor de minimalisering van de kosten door eventueel meer zuigers in te zetten, op dit type grondverzet niet is toegepast.

TABEL 1. Transportplan voor de ruilverkaveling Amerkant (Van Duin en Eelkema 1962).

Wijze van grondverwerking	Eenheids-prijs (gld/m³)	m³ grond verkregen uit:							Totaal	
		leidingen	sloten	dijken	ontgra-ving	egalisatie	opploegen	schillen	hoe-veelheid m³	kosten in gld.
Overslaan in te dempen sloten	1,15		16895						16895	19429,25
Removed by draglines into old ditches										
Idem	1,35	8100							8100	10935,—
Spreiden	0,65			72130					72130	46884,50
Spreading										
Idem	1,25		17945						17945	22431,25
Afvoeren t.b.v. dempingen via depôt	3,90	115110							115110	448929,—
Temporarily in stockpile										
Direct afvoeren over gem. 200 m	2,35			91570					91570	215189,50
Directly transported over 200 m										
Idem 200 m	2,55				27645				27645	70494,75
Idem 200 m	3,15		141425						141425	445488,75
Idem 300 m	3,—	177670							177670	533010,—
Idem 700 m	3,—			136920					136920	410760,—
Idem 700 m	3,30				26050				26050	85965,—
Idem 700 m	3,65	57790							57790	210933,50
Idem 700 m	4,10		12500						12500	51250,—
Idem 1500 m	3,90				20090				20090	78351,—
Idem 1500 m	4,75	9200							9200	43700,—
Verwerken in kaden	1,85			21500					21500	39775,—
New levees										
Verwerken in afdamming	3,—			6600					6600	19800,—
Dams										
Afschuiven in te dempen kreken	0,75			132580					132580	99435,—
Dozing into water-holes										
Idem (38 ha à f 2170,—)	0,73					113135			113135	82460,—
Idem sloten (143 ha à f 1600,—)	1,57						146095		146095	228800,—
Dozing into ditches										
Idem, kleine sloten	1,25							171865	171865	214831,25
Dozing into small ditches										
	2,22	367870	188765	461300	73785	113135	146095	171865	1522815	3378852,75
Kosten per soort werk in guldens		1247507,50	538599,25	831844,—	234810,75	82460,—	288800,—	214831,25		3378852,75
Cost of work (Hfl)										
Idem in % van totaal		37,0	15,9	24,7	6,9	2,4	6,8	6,3	100	3378852,75
Idem in % of total cost										
Method of moving earth	*Cost (Hfl/m³)*	*channels*	*ditches*	*dikes*	*cuts*	*levelling*	*dozing subsoil*	*dozing topsoil*	*yardage (m³)*	*total cost (Hfl)*
		Amount of earth (m³) coming from								*Total*

TABLE 1. *Transport scheme for the reallocation Amerkant (Van Duin en Eelkema 1962).*

2. MINIMALISERING VAN DE KOSTEN VAN GRONDVERZET

Voordat een werk wordt uitgevoerd zal in de meeste gevallen een planningsschema worden opgesteld. In dit schema wordt het verband in de tijd tussen de uitvoering van de verschillende onderdelen aangegeven. Met behulp van een rekenprocedure, b.v. de netwerkplanning, kan de totaal benodigde tijd worden geraamd voor de uitvoering van het gehele werk. Hierbij wordt uitgegaan van de geschatte uitvoeringstijden per onderdeel. Indien uit de berekeningen blijkt, dat de totale tijdsduur van het project niet in overeenstemming is met de gestelde termijn zullen de geschatte uitvoeringstijden per onderdeel moeten worden herzien en kan de rekenprocedure worden herhaald. De nieuwe schattingen kunnen gebaseerd zijn op het inzetten van een groter of kleiner aantal van de oorspronkelijke machines of op het inzetten van andere machines. Het veranderen van de geschatte uitvoeringstijden per onderdeel kan een verandering veroorzaken in de uitvoeringskosten per onderdeel en in de uitvoeringskosten voor het gehele werk. Naast deze veranderingen kunnen wijzigingen optreden in andere posten van de begroting. Indien bijvoorbeeld meer machines moeten worden ingezet, moet rekening worden gehouden met de mogelijkheid, dat naast de kostenstijging voor de uitvoering ook de 'overhead'-kosten tengevolge van een ingewikkelder organisatie kunnen stijgen.

Bij de berekening van de uitvoeringskosten voor een onderdeel of voor het gehele werk kunnen twee benaderingen worden gevolgd; teweten een continue en een geheeltallige benadering. Bij de eerste benadering wordt aangenomen dat een fractie van een machine een onderdeel van het werk of een gedeelte daarvan kan uitvoeren; bij de tweede benadering kan alleen een geheel aantal machines worden ingezet.

De uitvoeringskosten, inclusief de aanvoerkosten voor een onderdeel van een werk worden berekend met:

$$c_{i,j} = t_{i,j}\, h_i + a_i ij_i \qquad (1)$$

waarin:

$c_{i,j}$ = uitvoeringskosten inclusief aanvoerkosten onderdeel j door machine type i

$t_{i,j}$ = uitvoeringstijd geheel onderdeel j door één machinetype i

h_i = kosten per tijdseenheid voor machine i

a_i = aanvoerkosten één machinetype i

ij_i = aantal machines van type i

Het aantal machines van type i (ij_i) wordt bepaald door $t_{i,j}/T$, waarin T de gestelde termijn is onder de voorwaarde dat $ij_i \geqslant 0$. Voor de geheeltallige benadering geldt bovendien dat ij_i een geheel getal moet zijn.

Als voorbeeld van de relatie tussen de gestelde uitvoeringstermijn en de uitvoeringskosten, inclusief de aanvoerkosten (de termijn-kostenlijn) wordt een

werk gekozen, dat uit twee onderdelen bestaat die beide met twee verschillende machines (of machine-combinaties) kunnen worden uitgevoerd. De aanvoerkosten van de machines A en B en de uitvoeringstijden en -kosten exclusief de aanvoerkosten ($t_{i,j}$ h_i) voor de uitvoering van de onderdelen 1 en 2 zijn in tabel 2 opgenomen. De tijden en kosten zijn in standaardeenheden gegeven.

TABEL 2. Aanvoerkosten (in standaardgeldeenheden) van de machines A en B en de uitvoeringstijden (in standaardtijdeenheden) en -kosten exclusief de aanvoerkosten (in standaardgeldeenheden) van de onderdelen 1 en 2 van een werk met de machines A en B.

	Machine	
	A	B
Aanvoerkosten	1	3
Cost of transport to work		
Uitvoeringstijd voor onderdeel 1	24	15
Time of completing element 1		
Uitvoeringskosten voor onderdeel 1 (exclusief aanvoerkosten)	3	1
Cost of completing element 1 (excluding cost of transport to work)		
Uitvoeringstijd voor onderdeel 2	8	6
Time of completing element 2		
Uitvoeringskosten voor onderdeel 2 (exclusief aanvoerkosten)	5	4
Cost of completing element 2 (excluding cost of transport to work)		

TABLE 2. *Cost of transport for machines A and B and time and cost of completing a job (excluding cost of transport to work) for elements 1 and 2 of a job with these machines, in standard units of money and time, respectively.*

Voor de continue benadering zijn in fig. 1 de termijnkostenlijnen gegeven voor de uitvoering van de onderdelen 1 en 2 met de machines A en B. Deze lijnen zijn berekend met behulp van formule 1 en de gegevens van tabel 2. Zo zijn b.v. voor een termijn van 6 tijdseenheden de uitvoeringskosten van onderdeel 1 door machine B: $1 + (15/6).\ 3 = 8{,}5$ geldeenheden.

In fig. 2 zijn de termijn-kostenlijnen gegeven voor de uitvoering van de onderdelen van het werk met de machines A en B indien per onderdeel een geheel aantal machines wordt aangevoerd (geheeltallige benadering). De berekening van de uitvoeringskosten is gelijk aan die bij de continue benadering met dien verstande dat het, door het quotiënt van $t_{i,j}$ en T bepaalde, aantal machines naar boven moet worden afgerond. Voor eenzelfde voorbeeld als bij de continue benadering worden de uitvoeringskosten van onderdeel 1 door machine B: $1 + (3).\ 3 = 10$.

De uitvoeringskosten voor het gehele werk kunnen per termijn worden bepaald door een zodanige selectie uit de uitvoeringskosten per onderdeel van de verschillende machines te maken, dat de onderdelen van het werk éénmaal worden uitgevoerd. De laagste kosten voor de uitvoering van het werk worden verkregen door het minimaliseren van:

$$C = \sum_i \sum_j k_{i,j} x_{i,j} + \sum_i a_i i j_i \qquad (2)$$

onder de voorwaarden:

$\sum_j t_{i,j} x_{i,j} - T ij_i \geqslant 0 \; (i = 1,2\ldots)$

$\sum_i x_{i,j} = 1 \qquad (j = 1,2\ldots)$

$x_{i,j} \geqslant 0$

$ij_i \geqslant 0$

waarin:

C = uitvoeringskosten voor het gehele werk

$k_{i,j}$ = uitvoeringskosten, exclusief aanvoerkosten, onderdeel j door machinetype i

a_i = aanvoerkosten één machinetype i

$t_{i,j}$ = uitvoeringstijd geheel onderdeel j door één machinetype i

T = gestelde termijn

$x_{i,j}$ = fractie onderdeel j, uitgevoerd door machinetype i

ij_i = aantal machines van type i

Voor een 25-tal termijnen zijn voor het reeds eerder genoemde werk de minimale kosten voor de uitvoering berekend. In tabel 3 zijn de resultaten van de berekeningen gegeven, zowel voor de continue als geheeltallige benadering.

FIG. 1. Relatie tussen de uitvoeringstermijn (in standaardtijdeenheden) en de kosten per onderdeel (in standaardgeldeenheden) bij de uitvoering van een werk, verdeeld in onderdelen 1 en 2 met de machines A en/of B (continue benadering); $u_{A\ in\ 2}$ uitvoeringskosten voor onderdeel 2 met machine A; a_A en a_B aanvoerkosten voor de machines A enB.

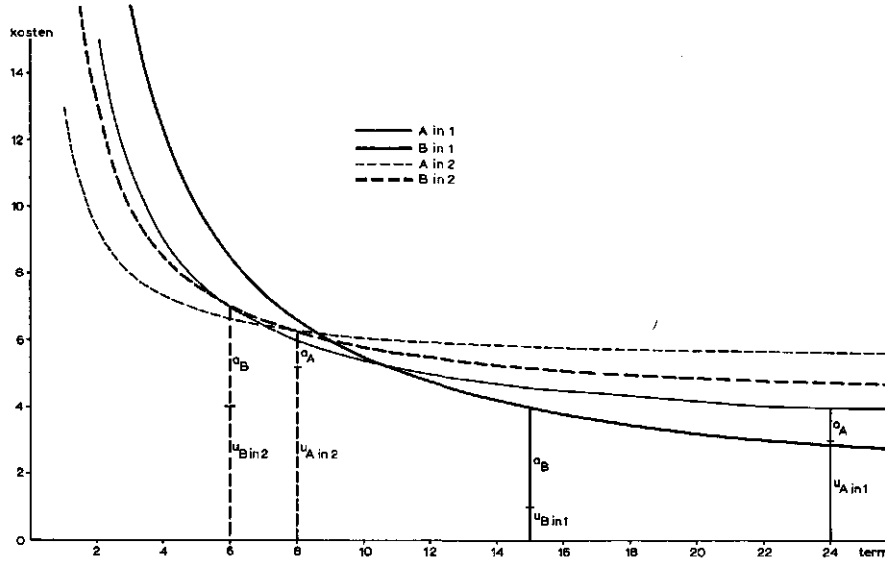


FIG. 1. *Relation between time to complete a job (in standard time units) and cost per element (in standard monetary units), split up into elements 1 and 2 with machines A and/or B (according continuous method); $u_{A\ in2}$ cost of completing element 2 by machine A; a_A and a_B cost of transporting machine A and B to job.*

FIG. 2. Relatie tussen de uitvoeringstermijn (in standaardtijdeenheden) en de kosten per onderdeel (in standaardgeldeenheden) bij de uitvoering van een werk, verdeeld in de onderdelen 1 en 2 met de machines A en/of B (geheeltallige benadering); $u_{A\ in\ 2}$ uitvoeringskosten voor onderdeel 2 met machine A; a_A en a_B aanvoerkosten voor de machines A en B.

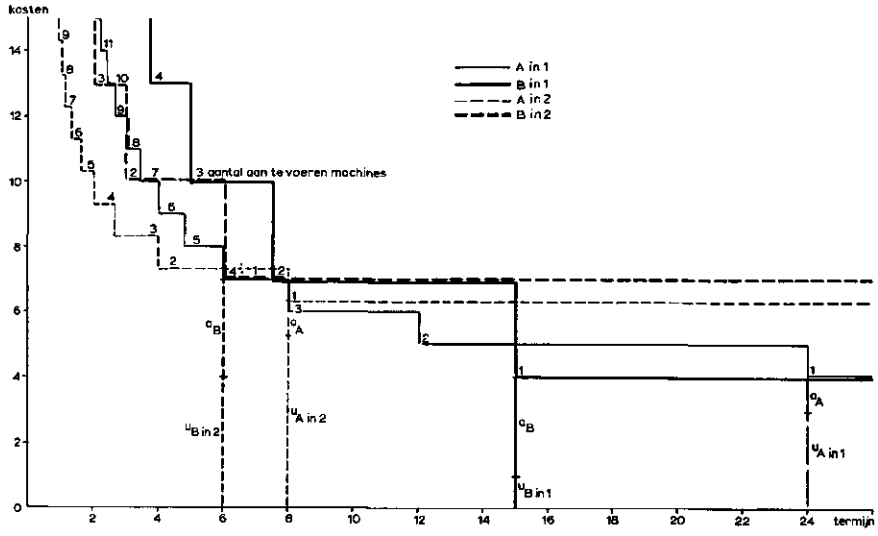


FIG. 2. *Relation between time to complete a job (in standard time units) and cost per element (in standard monetary units) if job is split up into elements 1 and 2 with machines A and/or B (according discrete method); $u_{A\ in\ 2}$ cost of completing element 2 by machine A; a_A and a_B cost of transporting machines A and B to job.*

Hieruit blijkt, dat bij de continue benadering tot en met een termijn van 10 tijdseenheden de onderdelen 1 en 2 door machine A worden uitgevoerd. Na deze termijn wordt het werk in zijn geheel door machine B uitgevoerd. Bij een toenemende tijdsduur van de gestelde termijn dalen de kosten en neemt het aantal in te zetten machines af. Voor een oneindig lange termijn naderen de uitvoeringskosten het niveau van de uitvoeringskosten exclusief de aanvoerkosten; voor een uiterst korte termijn stijgen de uitvoeringskosten tot zeer hoge waarden.

Bij de geheeltallige benadering wordt tot en met een termijn van 8 tijdseenheden het gehele werk door machine A uitgevoerd. Voor een termijn van 6 tijdseenheden blijkt ook de oplossing voor de uitvoering van het werk met 4 machines type A en 1 machine type B te voldoen. In deze situatie voert machine B het gehele onderdeel 2 uit. Na de termijn van 8 tijdseenheden tot en met een termijn van 20 tijdseenheden worden zowel machines van het type A als B ingezet om het werk uit te voeren. Het aandeel van de machines in de uitvoering van de verschillende onderdelen varieert met de gestelde termijn. Beginnend bij de termijn van 21 tijdseenheden wordt het werk door één machine van het type B uit-

TABEL 3. Minimale uitvoeringskosten (C) type en aantal in te zetten machines voor de uitvoering van een werk bestaande uit twee onderdelen met een 2-tal machinetypen binnen een gestelde termijn (T);
ij_1 = aantal machines A, ij_2 = aantal machines B, $x_{1,1}$ = fractie onderdeel 1 uitgevoerd door A, $x_{1,2}$ = fractie onderdeel 2 uitgevoerd door machine A.

	Continue oplossing							Geheeltallige oplossing						
T	C	ij_1	ij_2	$x_{1,1}$	$x_{1,2}$	$x_{2,1}$	$x_{2,2}$	C	ij_1	ij_2	$x_{1,1}$	$x_{1,2}$	$x_{2,1}$	$x_{2,2}$
1	40	32	0	1	1	0	0	40	32	0	1	1	0	0
2	24	16	0	1	1	0	0	24	16	0	1	1	0	0
3	18,67	10,67	0	1	1	0	0	19	11	0	1	1	0	0
4	16	8	0	1	1	0	0	16	8	0	1	1	0	0
5	14,40	6,4	0	1	1	0	0	15	7	0	1	1	0	0
6	13,33	5,33	0	1	1	0	0	14	6	0	1	1	0	0
									4	1	1	0	0	1
7	12,57	4,57	0	1	1	0	0	13	5	0	1	1	0	0
8	12	4	0	1	1	0	0	12	4	0	1	1	0	0
9	11,56	3,56	0	1	1	0	0	11,75	2	1	0,50	0,75	0,50	0,25
10	11,20	3,20	0	1	1	0	0	11,47	2	1	0,73	0	0,27	1
11	10,73	0	1,91	0	0	1	1	11	3	0	1	1	0	0
12	10,25	0	1,75	0	0	1	1	11	3	0	1	1	0	0
13	9,85	0	1,62	0	0	1	1	10,07	1	1	0,53	0	0,47	1
14	9,50	0	1,50	0	0	1	1	9,93	1	1	0,47	0	0,53	1
15	9,20	0	1,40	0	0	1	1	9,80	1	1	0,40	0	0,60	1
16	8,94	0	1,31	0	0	1	1	9,67	1	1	0,33	0	0,67	1
17	8,71	0	1,24	0	0	1	1	9,53	1	1	0,27	0	0,73	1
18	8,50	0	1,17	0	0	1	1	9,40	1	1	0,20	0	0,80	1
19	8,32	0	1.11	0	0	1	1	9,27	1	1	0,13	0	0,87	1
20	8,15	0	1,05	0	0	1	1	9,13	1	1	0,07	0	0,93	1
21	8	0	1	0	0	1	1	8	0	1	0	0	1	1
22	7,86	0	0,95	0	0	1	1	8	0	1	0	0	1	1
23	7,74	0	0,91	0	0	1	1	8	0	1	0	0	1	1
24	7,62	0	0,87	0	0	1	1	8	0	1	0	0	1	1
25	7,52	0	0,84	0	0	1	1	8	0	1	0	0	1	1
	Continuous solution							*Discrete solution*						

TABLE 3. *Minimum cost (C), type and number of machines used for finishing a job, divided into two elements with two types of machines, within a certain period of time (T);*
ij_1 = *number of machines type A;* ij_2 = *number of machines type B;* $x_{1,1}$ = *fraction element 1 executed by machine A;* $x_{1,2}$ = *fraction element 2 executed by machine A.*

gevoerd. Er treden dan geen veranderingen meer op in aantal en type in te zetten machines. Anders gesteld: indien voor de uitvoering van het werk een termijn van b.v. 24 tijdseenheden zou zijn gesteld, kan het werk in 21 tijdseenheden met het machinepark behorend bij een termijn van 24 tijdseenheden worden uitgevoerd. Het werk is dientengevolge 3 tijdseenheden eerder klaar. Een soortgelijke situatie doet zich voor bij de termijnen van 11 en 12 tijdseenheden.

3. KOSTENBEREKENING VAN GRONDVERZET

Bij de berekening van de kosten van het grondverzet worden een aantal elementen onderscheiden teweten: de hoeveelheid te verplaatsen grond, de afstand waarover de grond moet worden verplaatst, de prestatie en kosten per tijdseenheid van het machinepark dat in principe in aanmerking komt om het werk uit te voeren en de beschikbare tijd.

De kosten per tijdseenheid van een machine zijn te onderscheiden in vaste en variabele kosten. In de eerste categorie kunnen worden ondergebracht de posten voor belasting, verzekering, rente-verlies e.d.; in de tweede brandstof- en bedieningskosten en de kosten voor het onderhoud.

De afschrijving van een machine kan zowel in de vaste als in de variabele kosten worden ondergebracht afhankelijk van de afschrijving van de machine op basis van respectievelijk economische of technische levensduur. De afschrijving heeft een belangrijk aandeel in de kosten per tijdseenheid van een machine. Hierdoor kunnen deze kosten invloed hebben op het in te zetten machinepark voor een werk. Er kunnen nl. technisch nog in goede staat verkerende machines op een werk worden ingezet die hiervoor eigenlijk niet optimaal geschikt zijn. Deze machines kunnen echter, omdat zij volledig zijn afgeschreven, een lagere huurprijs hebben (vooropgesteld, dat de reparatiekosten niet te hoog worden) en concurreren met andere, beter geschikte machines.

De kosten worden in dit onderzoek bekend verondersteld. Zie o.a. Cultuurtechnische Dienst Voorschriften en Mededelingen (VEM), Nederlands Instituut voor Aannemers Groot-bedrijf (NIVAG) en het tijdschrift Het Machinepark.

3.1. Bepaling van hoeveelheden en van transportplan

3.1.1. *Hoeveelheden*

Voor de berekening van de hoeveelheden wordt gebruik gemaakt van een kaart die de bestaande terreinsituatie weergeeft (een hoogtekaart, een slootinhoudenkaart e.d.). Deze kaart kan afwijken van de terreinsituatie omdat tijdens de opname in het terrein meetfouten kunnen zijn gemaakt en een zekere idealisering is toegepast op de in kaart te brengen terreingegevens. Op basis van deze kaart wordt, door toepassing van een ontwerptechniek, een nieuwe situatie ontworpen. De berekening van de hoeveelheden komt in feite neer op de bepaling van het verschil per punt tussen de oude en de ontworpen situatie. Hoe geringer het verschil is tussen de oude en de nieuwe situatie des te kleiner de hoeveelheid te verplaatsen grond zal zijn. Het verschil is de basis voor de kostenberekening van het grondverzet.

Voor het ontwerpen van een nieuwe maaiveldsligging zijn verschillende rekentechnieken ontwikkeld (Visser 1959, Benedict e.a. 1964, Busser en Mijnlieff 1972).

Wil de kostenraming voor een grondverzetsplan aan zijn doel beantwoorden dan zal de situatie na uitvoering van het plan het ontwerp zo goed mogelijk moeten benaderen. Indien van het ontwerp wordt afgeweken bestaat de mogelijkheid, dat de berekende hoeveelheid verschilt van de hoeveelheden die tijdens de uitvoering van het werk worden verplaatst. Door de wijziging van de hoeveelheden veranderen in de meeste gevallen ook de transportafstanden. Een combinatie van deze twee facetten kan ertoe leiden, dat andere machines het werk beter en goedkoper zouden kunnen uitvoeren dan de machines, waarop de kostenberekening is gebaseerd.

3.1.2. *Transportplan*

Na de berekening van de hoeveelheden, die vervolgens als vaststaande worden aangenomen, moeten de bijbehorende transportafstanden worden bepaald. In de praktijk worden de transportafstanden in een aantal afstandsklassen ingedeeld. Op basis van deze indeling wordt het werk beoordeeld en wordt een keuze gemaakt uit de machines of machinecombinaties die voor dit werk geschikt zijn.

Voor het grondverzet bij de aanleg van een weg bepaalt SCHOSZ (1966) alle mogelijke afstanden tussen de plaatsen waar grond moet worden ontgraven en gestort. Tussen deze plaatsen kunnen obstakels voorkomen, zodat omwegen moeten worden gemaakt. Deze omwegen worden in de afstand tussen de plaatsen verdisconteerd. Op de verbindingslijnen wordt een groep machines ingezet en de kosten van het grondverzet voor iedere verbindingslijn en elke machine berekend. De machine, die het grondverzet volgens een bepaalde lijn met de geringste kosten uitvoert, wordt gekozen. Met behulp van een optimaliseringsprogramma worden de plaatsen waar grond moet worden ontgraven en gestort zodanig verbonden, dat voor het gehele project de geringste kosten worden verkregen. Het transportschema dat op deze manier ontstaat is afhankelijk van het gebruikte machinepark. Door herhaling van het proces met een andere groep machines kan uit de verschillende groepen machines de groep worden gekozen met de minste kosten. Voor projecten waar op veel verschillende plaatsen grond moet worden ontgraven en gestort wordt een groot deel van de capaciteit van de computer in beslag genomen voor de berekening van de transportafstanden. Hierdoor kunnen momenteel slechts een beperkt aantal machines in de groepen worden opgenomen (SCHOSZ 1966).

Een andere benadering is om in eerste instantie de transportafstanden binnen het gehele werk te minimaliseren. Dit heeft het voordeel dat meer machines in de berekening kunnen worden opgenomen, omdat nu minder geheugenruimte in beslag wordt genomen door de afstandsberekeningen. Deze benadering wordt in het onderhavige onderzoek gevolgd. Een nadeel is, dat het transportschema onafhankelijk is van het in te zetten machinepark.

Bij de berekening van de minimale transportafstanden in een project kunnen een aantal situaties worden onderscheiden afhankelijk van de ligging van de te ontgraven en aan te brengen grond (op één plaats of meer plaatsen) en de mogelijke transportroutes tussen de plaatsen waar grond moet worden ontgraven

en gestort. Indien tussen de plaatsen, waar grond moet worden onttrokken en waar grond moet worden aangebracht, geen hindernissen voorkomen, kunnen de plaatsen rechtstreeks worden verbonden. Voor het geval, dat de te ontgraven grond op één plaats is geconcentreerd en de aan te brengen grond op één of meer plaatsen moet komen te liggen, worden de transportroutes en transportafstanden bepaald door de rechtstreekse verbindingslijnen van de afzonderlijke stortplaatsen naar de centrale winplaats. Ligt de te ontgraven grond eveneens op twee of meer plaatsen, dan ontstaat een keuze, welke win- met welke stortplaats moet worden verbonden.

Met behulp van een combinatie van de algoritmen van Floyd, Ford en Fulkerson blijkt het mogelijk te zijn de transportroutes en -afstanden te berekenen (R. J. Bos 1969, Busser en Mijnlieff 1972). In dit programma, dat ook in dit onderzoek wordt gebruikt, worden de afstanden berekend van elke plaats, waar grond moet worden ontgraven naar elke plaats, waar grond moet worden aangebracht. Daarna wordt de sommatie van het produkt van de afzonderlijke afstanden en hoeveelheden geminimaliseerd. Het transportschema wordt zodanig gekozen, dat de naar hoeveelheid gewogen gemiddelde transportafstand minimaal is.

Mochten tussen de plaatsen, waar grond wordt ontgraven en grond wordt gestort, hindernissen voorkomen, dan kunnen deze plaatsen niet alle rechtstreeks met elkaar worden verbonden. De verbindingslijnen, waarlangs het transport plaatsvindt, moeten via één of meer van te voren aangewezen punten lopen. Deze punten moeten zodanig worden gesitueerd, dat de hindernis wordt ontweken. Het invoeren van deze punten (dwangpunten) kan worden gemotiveerd met een alternatieve kostenberekening waarbij een korte route, met de daarbij behorende kosten voor transport en voorzieningen voor de transportweg, wordt vergeleken met de kosten voor een langere route.

De volgende overwegingen kunnen een rol spelen bij het invoeren van de dwangpunten:

- het terrein waarover de rechtstreekse transportroute loopt wordt niet geschikt geacht voor het transport. Dit kan worden veroorzaakt door een te geringe draagkracht van de grond of door de overweging, dat de herstelkosten c.q. schadevergoedingen ten gevolge van het transport te hoog worden.
- het transport is genoodzaakt van een bepaald passagepunt gebruik te maken b.v. een overweg, brug, etc.
- het transport is gebonden aan een transportweg die relatief hoge installatiekosten heeft, zoals b.v. rijplaten, smalspoor en pijpleidingen. De punten waar in een eerdere fase van het werk grond is aangevoerd, dienen als dwangpunten te worden beschouwd voor de volgende punten.
- door het transport kan verdichting van de grond optreden. In de wegenbouw wordt hiervan gebruik gemaakt door het transport over het te verdichten terrein te leiden, zodat verdere verdichtingswerkzaamheden vervallen of tegen geringere kosten kunnen worden uitgevoerd.

Indien de ontgraving op één plaats is geconcentreerd en het transport naar de

plaatsen waar grond moet worden gestort gebonden is aan een route, die relatief hoge installatiekosten heeft, kan het algoritme van PRIM (1957) worden gebruikt[1]. Hierbij worden in eerste instantie de centrale winplaats en alle plaatsen waar grond moet worden gestort of waar de route langs moet lopen (dwangpunten) met elkaar verbonden. Uit het netwerk, dat op deze manier ontstaat, wordt een zodanige selectie van verbindingen gemaakt dat elk punt – behalve de centrale winplaats – één keer als aankomstpunt fungeert (boomstructuur).

Uit de verschillende mogelijkheden wordt die oplossing gekozen, waarbij de totale lengte van de verbindingslijnen minimaal is.

Het transportschema voor het 'droge grondverzet' i.e. het grondverzet met behulp van graafmachines, al of niet gecombineerd met transportmiddelen, bulldozers e.d., wordt gebaseerd op de naar hoeveelheid gewogen gemiddelde transportafstand. Voor het hydraulisch grondverzet wordt het tracé van de persleiding bepaald met het algoritme van PRIM (1957).

3.2. BEREKENING VAN MACHINEPRESTATIES

Een werk kan met één machine (enkelvoudige werkmethode) of een machinecombinatie (gecombineerde werkmethode) worden uitgevoerd. Bij de gecombineerde methode wordt het werk tot stand gebracht met machines die afhankelijk van elkaar zijn (VERHAGEN 1969). De prestatie per tijdseenheid van een machine of een machinecombinatie wordt o.a. bepaald door de geschiktheid van de betreffende machine(s) voor het werk. Naast gespecialiseerde machines komen werktuigen voor, die voor allerlei soorten werkzaamheden kunnen worden ingezet. Zonodig worden zij, indien hulpmiddelen eenvoudig zijn aan te brengen, aan de omstandigheden aangepast.

De prestaties per tijdseenheid van de machines kunnen o.a. gebaseerd zijn op tijdstudies voor afgeronde werkzaamheden, praktijkervaring (b.v. vastgelegd in vuistregels) of een analyse van de werkhandelingen in combinatie met tijdstudies. Omdat de prestatie per tijdseenheid gebaseerd is op een gemiddelde situatie moeten veelal correctiefaktoren worden ingevoerd. Om de technische ontwikkeling van de machines te verdisconteren moeten de gegevens voortdurend worden aangepast.

Voor de berekening van de kosten van het grondverzet met verschillende machines zijn in het kader van het onderhavige onderzoek een aantal computerprogramma's ontwikkeld, gebaseerd op de prestatie-bepalende faktoren van de machines. Door deze werkwijze kunnen de uitvoeringsomstandigheden in het rekenproces worden opgenomen, indien zowel de kwalitatieve als kwantitatieve gegevens hierover en hun aangrijpingspunt op de prestatie-bepalende faktoren bekend zijn. Voor een aantal bij de uitvoering van cultuurtechnische werken thans veel voorkomende machines wordt dit toegelicht.

De in dit onderzoek opgenomen machines zijn draglines en hydraulische

[1] Het hier gebruikte programma gebaseerd op het algoritme van Prim werd opgesteld door Jac. M. Anthonisse van het Mathematisch Centrum te Amsterdam.

dieplepels (graafmachines), dumpers (transportmiddelen), bulldozers (zelfladende, transporterende en lossende machines) en zuigers (machines voor hydraulisch grondverzet).

3.2.1. *Droog grondverzet*

De werkhandelingen die in het algemeen bij het droog grondverzet kunnen worden onderscheiden zijn het vullen van een bak, het eigenlijke transport en het lossen van de grond. De handelingen of groepen van handelingen, die bij het droog grondverzet kunnen worden onderscheiden zijn voor de verschillende machines:

Graafmachine

t_f = tijd nodig voor vullen van bak (sec)
t_{zv} = tijd nodig voor manoeuvreren van volle bak in stortpositie (sec)
t_{lb} = tijd nodig voor lossen van bak (sec)
t_{zl} = tijd nodig voor manoeuvreren van lege bak in graafpositie (sec)
t_{wt} = wachttijd van graafmachine op te laden transportmiddel (sec)
t_p = tijd nodig voor verplaatsen van graafmachine (sec)

Transportmiddel

t_{la} = tijd nodig voor laden van transportmiddel (sec)
t_k = tijd nodig voor aan- en afkoppelen van een getrokken bak aan een motorisch gedeelte (sec)
t_s = tijd nodig voor schakelen, optrekken, afremmen e.d. (sec)
t_m = tijd nodig voor manoeuvreren bij laad- en stortplaats (sec)
t_{lo} = tijd nodig voor lossen van transportmiddel (sec)
t_{rv} = transporttijd voor een geladen transportmiddel (sec)
t_{rl} = transporttijd voor een leeg transportmiddel (sec)
t_{wr} = wachttijden die optreden tijdens transport (b.v. wisselplaatsen) (sec)
t_{wg} = wachttijden van transportmiddel op graafmachine (sec)
t_{wl} = wachttijden ter plaatse van het stort (sec)

De transporttijd voor een geladen transportmiddel kan worden geschreven als:

$$t_{rv} = \sum_{i=1}^{p} \frac{d_i}{v_{v,i}} \tag{3}$$

waarin:

d_i = gedeelte i van de transportafstand winplaats-stort (m)
$v_{v,i}$ = snelheid geladen transportmiddel op traject d_i (m sec^{-1})
p = aantal gedeelten van de transportweg met verschillende kwaliteiten voor de berijdbaarheid (transportsnelheid)

Evenzo kan voor de transporttijd voor een leeg transportmiddel de volgende vergelijking worden opgesteld:

$$t_{rl} = \sum_{j=1}^{q} \frac{d_j}{v_{l,j}} \tag{4}$$

waarin:

d_j = gedeelte j van de transportafstand stort-winplaats (m)

$v_{l,j}$ = snelheid leeg transportmiddel op traject d_j (m sec^{-1})

q = aantal gedeelten van de transportweg met verschillende kwaliteiten voor de berijdbaarheid (transportsnelheid)

De cyclustijd (t_g) voor een graafmachine kan worden weergegeven door:

$$t_g = t_f + t_{zv} + t_{lb} + t_{zl} \tag{5}$$

Afhankelijk van de machine kan t_p hierin worden opgenomen b.v. indien na elke cyclus de machine moet worden verplaatst.

De cyclustijd van een transportmiddel (t_t) kan worden geformuleerd als:

$$t_t = t_{la} + t_k + t_s + t_m + t_{lo} + t_{rv} + t_{rl} + t_{wr} + t_{wl} \tag{6}$$

De wachttijden t_{wl} en t_{wg} zijn niet in de formules 5 en 6 ingebracht, omdat deze tijden alleen optreden bij gecombineerde werkmethoden.

Opgemerkt zij, dat voor de tijden nodig voor de handelingen de werkelijke tijden worden genomen. De op het werk voorkomende aan- en aflooptijden, reparatie en onderhoud van de machines, persoonlijke verzorging e.d. worden niet in de berekeningen opgenomen. Omdat een aantal handelingen gelijktijdig kan gebeuren, b.v. het hijsen van de bak en het zwenken van de graafmachine en/of in elkaar overgaan zoals ontgraven, laden, transporteren en lossen bij een bulldozer, moet voor iedere machine of machinecombinatie een keuze worden gemaakt uit de relevante faktoren.

3.2.1.1. Graafmachine

Bij de graafmachines kunnen, indien het verplaatsen van de machine buiten beschouwing wordt gelaten, twee machinegegevens worden onderscheiden die uiteindelijk de prestatie bepalen: de bakinhoud en de cyclustijd. De bakinhoud van de graafmachine is veelal gedefinieerd als de 'waterinhoud'. Om de werkelijke inhoud aan grond van de bak te bepalen wordt een aantal faktoren in rekening gebracht die als functie van de waterinhoud kunnen worden beschouwd. Als faktoren kunnen o.a. worden genoemd (KÜHN, 1958; VERHAGEN, 1963) de:

- vulfaktor
- uitleveringsfaktor voor de grondsoort
- faktor voor de verhouding van grootte en vorm van het te ontgraven profiel en bakinhoud

De in de cyclustijd van een graafmachine opgenomen handelingen (5) worden beïnvloed door verschillende faktoren. Zo is t_f afhankelijk van de verplaatsingssnelheid van de bak door de grond, de profielgrootte, de vorm van de ontgraving en de lengte van de graafweg. De verplaatsingssnelheid van de bak door de grond wordt beïnvloed door een aantal machinegegevens zoals motorvermogen en overbrenging, bakgrootte, -vorm, gewicht, het al of niet aanwezig zijn

van graaftanden, de vorm hiervan en de weerstand van de grond. De lengte van de graafweg is afhankelijk van de mogelijkheden van de machine om de bak uit te gooien of uit te zetten (gieklengte resp. reikwijdte van de graafarm). Binnen de mogelijkheden van de machine kan de machinist de graaflengte variëren. Om bij het graven een zo goed mogelijk gevulde bak te krijgen kan men de graaflengte laten toenemen indien de te ontgraven grond hard is (KÜHN, 1958; VERHAGEN, 1963).

De tijd nodig om de volle bak in een stortpositie te manoeuvreren (t_{zv}) wordt bepaald door het motorvermogen en overbrengingsmechanisme van de machine en het gewicht van de gevulde bak. De graafdiepte beïnvloedt de tijd die nodig is voor het heffen en laten zakken van de bak. Indien de situatie en het motorvermogen het toelaten kan het heffen gelijktijdig gebeuren met het zwenken. De tijd voor het zwenken wordt bepaald door de maximale zwenksnelheid, het acceleratievermogen en de zwenkhoek. De eerste twee faktoren kunnen als machinegegevens worden beschouwd; de laatste is afhankelijk van de plaats van de machine t.o.v. ontgraving en stort (KÜHN, 1958; VERHAGEN, 1963).

De tijd voor het lossen van de bak (t_{lb}) wordt bepaald door de mate waarin de grond aan de bakwand kleeft en door de vorm en grootte van de graafbak. Bij het laden van een transportmiddel of een bunker wordt de lostijd mede beïnvloed door de verhouding tussen de vorm en grootte van de graafbak en de bak van het transportmiddel of bunker. De tijd t_{zl} wordt beïnvloed door zwenksnelheid, graafdiepte en gewenste positie van de graafbak bij het begin van het graven (lengte van de graafweg).

Van de verschillende graafmachines die in de praktijk worden gebruikt is het vooral de dragline, waarvan de meeste gegevens beschikbaar zijn. Voor de prestaties in m^3 per uur van een aantal typen graafmachines geeft KÜHN (1956) de volgende vuistregels:

hooglepel	100 × bakinhoud
dieplepel	65 × bakinhoud
dragline	90 × bakinhoud
grijper	50 × bakinhoud

VAN GILST (1963) heeft een uitgebreid onderzoek verricht naar de prestaties van diverse machines op cultuurtechnische werken. De prestaties werden bepaald door de tijd te meten die verschillende machines onder diverse omstandigheden nodig hebben om een bepaalde hoeveelheid grond te verzetten. De werkhandelingen werden niet afzonderlijk opgenomen.

Het CALCULATIE-VADEMECUM VAN DE KONINKLIJKE NEDERLANDSE HEIDEMAATSCHAPPIJ (1963) berust eveneens op soortgelijke tijdstudies. De gegevens zijn grafisch en/of tabellarisch weergegeven en zijn gebaseerd op een gemiddelde situatie. Om veroudering te voorkomen worden de gegevens periodiek herzien.

KÜHN (1958) en VERHAGEN (1963) geven een uitvoerige beschrijving en analyse van de werkhandelingen van de dragline en de faktoren, die op deze handelingen van invloed zijn. Om de verschillende soorten en typen draglines te kunnen vergelijken worden een aantal begrippen ingevoerd, waarin gieklengte, gewicht

van de emmer inclusief gewicht van de afgestreken hoeveelheid grond en beschikbaar aantal pk's zijn verdisconteerd. Voor gestandaardiseerde draglines zijn voor bepaalde omstandigheden de prestaties gegeven. In deze prestaties moeten nog de faktoren die voor andere omstandigheden gelden worden verdisconteerd.

3.2.1.2. Graafmachine met transportmiddelen

Bij de prestatiebepaling van de gecombineerde werkmethode bestaande uit een graafmachine en een aantal transportmiddelen spelen, naast de faktoren die de afzonderlijke prestaties beïnvloeden, de transportafstanden en de organisatie van het werk een grote rol.

De hoogste prestatie (m^3/uur) van een combinatie van een graafmachine en een aantal transportmiddelen wordt verkregen indien de graafmachine continu kan werken. Het aantal transportmiddelen dat moet worden ingezet om aan deze voorwaarde te voldoen, kan worden berekend door te stellen dat de cyclustijd van één transportmiddel, exclusief zijn laadtijd, gelijk moet zijn aan de laadtijd van de andere (geen wachttijden voor de graafmachine). Bij de uitvoering van het grondverzet worden hoofdzakelijk transportmiddelen gebruikt bestaande uit een trekker en een wagen of mobiele dumpers die tijdens het grondverzet niet worden of kunnen worden ontkoppeld. Voor deze situatie geldt $t_k = 0$.

Voor de berekening van het aantal transportmiddelen (n) bij een continu werkende graafmachine kan de volgende vergelijking worden opgesteld:

$$t_g \frac{b_t}{b_g} (n-1) + t_p = t_s + t_m + t_{lo} + t_{rv} + t_{rl} + t_{wr} + t_{wl} + t_{wg} \qquad (7)$$

Hierin is b_t/b_g het aantal keren, dat de inhoud van de bak van de graafmachine (b_g) wordt gestort in de bak van het transportmiddel (b_t).

Door omwerken gaat de vergelijking voor het aantal transportmiddelen (n) over in:

$$n = \frac{t_g \frac{b_t}{b_g} + t_s + t_m + t_{lo} + t_{rv} + t_{rl} + t_{wr} + t_{wl} + t_{wg} - t_p}{t_g \frac{b_t}{b_g}} \qquad (8)$$

Indien de graafmachine gedurende een lange tijd op één plaats blijft staan wordt $t_p = 0$. Voor $t_g \cdot b_t/b_g$ kan t_{la} worden ingevuld.

De formules, die in de literatuur worden gegeven, kunnen worden herleid uit bovenstaande vergelijking door de tijden in verschillende groepen te rangschikken. Zo onderscheidt KÜHN (1958) voor een continu werkende graafmachine een laadtijd (t_{la}), lostijd (t_{lo}), de lengte van de transportweg (2 keer de transportafstand) en een gemiddelde snelheid van de transportmiddelen. Door het in-

voeren van de gemiddelde snelheid worden t_s, t_m, t_{rv}, t_{rl}, t_{wr} en t_{wl} verdisconteerd. VERHAGEN (1963) onderkent een laadtijd (t_{la}), lostijd (t_{lo}), een gemiddelde lengte van de vervoersweg en een gemiddelde rijsnelheid inclusief stagnaties. De laadtijd wordt benaderd door het quotiënt van de bakinhoud van het transportmiddel en de prestatie per uur van de graafmachine (i.c. dragline). Door het invoeren van dit quotiënt ontstaat het risico dat een prestatie van de graafmachine wordt ingevoerd, waarbij reeds rekening is gehouden met wachttijden van de graafmachine op de transportmiddelen.

De vergelijking van VAN GILST (1963) voor het bepalen van het aantal transportmiddelen bij een continu werkende graafmachine berust op een formule, die overeenkomt met de vergelijking van VERHAGEN. Bij de afleiding van deze vergelijking, zo merkt VAN GILST op, is een constante gemiddelde snelheid in beschouwing genomen. Deze snelheid is opgebouwd uit tijden voor optrekken, rijden, afremmen, wenden en stoppen. Extrapolatie van het bij afstanden onder de 1000 m gevonden verband tussen transportafstand en aantal transportmiddelen naar grotere afstanden kan niet zonder meer worden toegepast, omdat rekening moet worden gehouden met hogere transportsnelheden bij toenemende afstand, aangezien in de meeste gevallen een betere transportweg over deze afstanden of een gedeelte daarvan beschikbaar is. Bovendien wordt relatief minder tijd in beslag genomen door het optrekken. Dit bezwaar wordt ondervangen in de benadering van VAN DUIN en LINTHORST (1962) die een gemiddelde kruissnelheid (combinatie t_{rv} en t_{rl}) en een tijd voor t_s, t_{wr} en t_{wl} hebben geïntroduceerd (tijdverliezen). De term t_m wordt met t_{lo} gecombineerd tot een tijd voor lossen en wenden. Voor t_{la} wordt uitgegaan van het quotiënt van de bakinhoud van het transportmiddel en de prestatie per tijdseenheid van de graafmachine; met het eerder genoemde bezwaar.

VAN KAMPEN (1969) berekent het aantal benodigde transportmiddelen bij een graanoogstmachine. Een formule voor deze situatie op basis van de genoemde handelingen is:

$$(t_f + t_{lb})\frac{b_t}{b_g}(n-1) + t_{wt} = t_k + t_s + t_m + t_{lo} + t_{rv} + t_{rl} + t_{wr} + t_{wg} + t_{wl} \quad (9)$$

De handelingen t_{zv} en t_{zl} zijn niet opgenomen; aangenomen wordt dat bij de graanoogst met een combine de te laden transportmiddelen goed zijn opgesteld ten opzichte van de oogstmachine. De tijd voor t_p is niet aanwezig, omdat de 'bak' mobiel is en deze tijd samenvalt met t_f. Voor b_g moet 'bunker' van de oogstmachine worden gelezen. Omdat bij de oogst van een overmaat aan transportmiddelen, i.e. losse wagens, wordt uitgegaan mag in dit geval t_{wt} worden verwaarloosd (de losse wagens worden gekoppeld aan een trekker en daarna vervoerd). De laadtijd kan worden bepaald door het quotiënt van bakinhoud van het transportmiddel en de prestatie per tijdseenheid van de combine.

Door samenvoeging en rangschikking kan de formule van VAN KAMPEN (1969) worden opgesteld. Tussen haakjes is aangegeven welke van de hier gebruikte termen in zijn formule tezamen zijn opgenomen.

$$n = \frac{(t_{la} + t_k + t_{lo}) + (t_{wr} + t_{wg} + t_{wl}) + (t_{rv} + t_{rl} + t_s + t_m)}{t_{la}} \qquad (10)$$

In de praktijk zal voor een bepaald werk dat uit verschillende onderdelen bestaat de transportafstand niet constant zijn. Ook binnen een werkonderdeel zal de transportafstand variëren. Bij een afstand die korter is dan waarvoor het aantal transportmiddelen is berekend, zullen wachttijden voor de transportmiddelen optreden, omdat er teveel transportmiddelen zijn. Omgekeerd zullen er bij een grotere afstand dan waarvoor het aantal transportmiddelen is berekend, transportmiddelen te weinig zijn waardoor wachttijden voor de graafmachine ontstaan en dientengevolge een prestatiedaling voor de gehele combinatie. Om de minimale kosten van het werk en de daarbij behorende optimale keuze van het machinepark te bepalen worden in dit onderzoek, gegeven het type graafmachine en transportmiddel, de uitvoeringstijden en -kosten per transportafstand voor elk aantal transportmiddelen berekend. Omdat de uitvoeringstijd en daarmee de kosten afhankelijk zijn van het optreden van wachttijden kan de volgende benadering worden gevolgd. In de formule voor het bepalen van het aantal transportmiddelen (8) wordt uitgegaan van een continu werkende graafmachine ($t_{wt} = 0$). Indien ook fracties van transportmiddelen kunnen worden ingezet is de formule voor het aantal transportmiddelen n' ($t_{wg} = 0$):

$$n'_t = \frac{t_{la} + t_r + t_e}{t_{la}} \qquad (11)$$

waarin:

n'_t = aantal transportmiddelen bij een continu werkende graafmachine waarbij ook fracties van transportmiddelen kunnen worden ingezet (geen wachttijden voor transportmiddelen)

t_{la} = laadtijd van een transportmiddel (sec)

t_r = samenvoeging van t_{rv} en t_{rl} zodanig dat over de transportafstand (heen en terug) met het gemiddelde van de snelheden van een geladen en leeg transportmiddel wordt gereden (gemiddelde snelheid) ($m.sec^{-1}$)

$t_e = t_s + t_m + t_{lo} + t_{wr}$ = vaste tijd = de som van de schakel- en manoeuvreertijden, lostijd en wachttijden tijdens het transport. De som wordt constant beschouwd (sec).

Omgewerkt geeft dit:

$$n'_t = 1 + \frac{\frac{U}{v} + t_e}{t_g \frac{b_t}{b_g}} \qquad (12)$$

waarin:

U = 2 maal de transportafstand; er wordt aangenomen dat de heenweg evenlang is als de terugweg (m)

v = gemiddelde snelheid (m sec^{-1})

$t_g \frac{b_t}{b_g}$ = laadtijd van een transportmiddel (t_{la}) (sec)

b_t = bakinhoud transportmiddel (m^3)

b_g = bakinhoud graafmachine (m^3)

t_g = cyclustijd graafmachine (sec)

De transportafstand tussen een opstellingsplaats van de graafmachine en het stort wordt constant verondersteld. Dit is aannemelijk, zolang de representatieve oppervlakten van het begin- en eindpunt van de transportweg niet te groot worden. B.v. de oppervlakte van een 10 × 10 m^2 of 20 × 20 m^2 ruitennet of gedeelten van een sloot van 10 m of 20 m, waarbij de plaats waar de grond moet worden ontgraven of gestort geconcentreerd wordt gedacht in het zwaartepunt.

Indien een kleiner aantal transportmiddelen dan n_t' voor een bepaalde afstand wordt ingezet, zullen er wachttijden voor de graafmachine optreden; voor de transportmiddelen treden geen wachttijden op. Gesteld wordt, dat de uitvoeringstijd voor het grondverzet wordt bepaald door de tijd die het eerste transportmiddel van een groep nodig heeft om zijn aandeel in het werk te leveren. Door dit transportmiddel moet een hoeveelheid grond worden vervoerd, die gelijk is aan de totale hoeveelheid gedeeld door het aantal transportmiddelen. Dit gebeurt in een aantal vrachten, dat gelijk is aan:

$$g_t = \frac{M}{n_t\, b_t} \tag{13}$$

waarin:

g_t = aantal vrachten per transportmiddel

M = hoeveelheid te verplaatsen grond over een bepaalde afstand (m^3)

n_t = geheel aantal transportmiddelen ($n_t < n_t'$) waarbij wachttijden voor de graafmachine optreden

De tijd voor één vracht volgt uit de laadtijd, rijtijd en vaste tijd, in formule:

$$t_t = \frac{b_t}{b_g} t_g + \frac{U}{v} + t_e \tag{14}$$

De uitvoeringstijd voor het grondverzet over een afstand U wordt berekend door de cyclustijd van een transportmiddel te vermenigvuldigen met het aantal vrachten.

$$T_{nt} = \frac{M}{n_t\, b_t} \left(\frac{b_t}{b_g} t_g + \frac{U}{v} + t_e\right) \tag{15}$$

waarin:

T_{nt} = uitvoeringstijd bij n_t transportmiddelen ($n_t < n_t'$)

De kosten voor de uitvoering bedragen:

$$K_{nt} = T_{nt} (f_g + n_t f_t) \tag{16}$$

waarin:

K_{nt} = uitvoeringskosten voor één graafmachine met n_t transportmiddelen ($n_t < n_t'$)

f_g = kosten per tijdseenheid graafmachine

f_t = kosten per tijdseenheid transportmiddel

Indien meer transportmiddelen dan n_t' worden ingeschakeld ontstaan wachttijden voor de transportmiddelen. De uitvoeringstijd wordt dientengevolge bepaald door de graaftijd van de graafmachine.

$$T_{mt} = \frac{M}{b_g} t_g \tag{17}$$

waarin:

T_{mt} = uitvoeringstijd graafmachine bij m_t transportmiddelen ($m_t \geqslant n_t'$) (sec)

De kosten voor de uitvoering bedragen:

$$K_{mt} = T_{mt}(f_g + m_t f_t) \tag{18}$$

waarin:

K_{mt} = uitvoeringskosten voor een graafmachine en m_t transportmiddelen ($m_t \geqslant n_t'$)

In deze vergelijkingen is de verplaatsingstijd van de graafmachine naar een volgende positie niet opgenomen. Deze kan worden verdisconteerd in de cyclustijd. Voor graafmachines met een vrij kort werkbereik (b.v. een hydraulische dieplepel) is deze benadering beter verantwoord dan voor machines met een lang werkbereik (dragline). In een situatie, waar wachttijden voor de graafmachine optreden, kan de wachttijd die ontstaat na het laden van de laatste vracht worden benut voor het verplaatsen van de machine.

De gegevens over de graafmachines (hfst. 4.4), die in het onderzoek worden gebruikt zijn berekend aan de hand van literatuurgegevens. Indien geen gegevens beschikbaar waren is door middel van tijdwaarnemingen en met behulp van praktijkervaring van verschillende deskundigen een schatting gemaakt. Voorzover tijden worden vermeld hebben deze betrekking op de werkelijke tijd om een handeling uit te voeren. Gezien de vele typen transportmiddelen die op cultuurtechnische werken worden ingezet, zijn in het onderzoek voor de snelheid en bakinhoud van de transportmiddelen gemiddelde waarden aangehouden.

3.2.1.3. Zelfladende, transporterende en lossende graafmachines

Voor een met een bak uitgeruste grondverzetsmachine die het vullen, transporteren en lossen van de bak in zijn geheel uitvoert, zijn de werkhandelingen redelijk te onderkennen. In vele gevallen echter, vooral bij machines die zijn uitgerust met een schuifblad, zijn de handelingen wel te onderscheiden maar

niet te scheiden. Het graven, laden, transporteren en lossen kan in één continue reeks van handelingen gebeuren of zelfs gelijktijdig op verschillende plaatsen van het blad. Voor het opstellen van de cyclustijd (t_z) van een zelfladende, transporterende en lossende machine kunnen de volgende al of niet gescheiden handelingen worden onderscheiden (zie ook hfst. 3.2.1):

t_f = tijd nodig voor vullen van bak (sec)
t_s = tijd nodig voor schakelen, optrekken, afremmen e.d. (sec)
t_{rv} = transporttijd voor geladen transportmiddel (sec)
t_{zv} = tijd nodig voor manoeuvreren volle bak in stortpositie (sec)
t_{wl} = wachttijden ter plaatse van het stort (sec)
t_{lb} = tijd nodig voor lossen van bak (sec)
t_{rl} = transporttijd voor leeg transportmiddel (sec)
t_{zl} = tijd nodig voor manoeuvreren lege bak in graafpositie (sec)
t_{wr} = wachttijden die optreden tijdens transport (sec)
t_{wg} = wachttijd die optreedt voordat met graven kan worden begonnen; b.v. een scraper die bij het graven moet worden geholpen door een bulldozer (sec)

Door rangschikking van de relevante handelingen kunnen voor verschillende soorten machines de vergelijkingen voor de cyclustijd worden opgesteld. Voor een scraper is deze b.v.:

$$t_z = t_f + t_s + t_{rv} + t_{zv} + t_{wl} + t_{lb} + t_{rl} + t_{zl} + t_{wr} + t_{wg} \qquad (19)$$

KÜHN (1956) geeft een vergelijking waarin respectievelijk ($t_{zv} + t_{zl}$) en ($t_{wl} + t_{wr} + t_{wg}$) zijn samengevoegd tot een term voor wendtijden en tijdverliezen. De scraper wordt op cultuurtechnische werken in Nederland weinig gebruikt omdat de draagkracht van de grond in vele gevallen te gering is voor dit grondverzetmaterieel en de orde van grootte van het grondverzet per ha op deze werken te gering is (VAN GILST, 1963), zodat dientengevolge de kosten te hoog worden.

Alhoewel de diverse fasen in het grondverzet met een bulldozer wel zijn te onderscheiden, is een scheiding niet goed mogelijk. Laden en transporteren gebeurt in de eerste meters gelijktijdig. Aan het einde van de transportweg vindt het lossen en transporteren eveneens simultaan plaats. In de tussenliggende transportfase kan verlies optreden. Indien de transportbaan zodanig ligt, dat het verlies van de vorige rit weer wordt meegenomen, wordt er tijdens het transport bijgeladen, waardoor het totale verlies wordt beperkt.

In het onderhavige onderzoek worden voor de bepaling van de cyclustijd van een bulldozer, de termen t_f, t_{lb}, t_{rv}, t_{rl} en t_{zv} omgewerkt tot een gemiddelde snelheid over een bepaalde afstand; de termen t_s, t_{wr} en t_{zl} worden verdisconteerd in een vaste tijd. Voor bulldozers die met een koppelomvormer (powershift) zijn uitgerust, vervallen de schakeltijden. CATERPILLAR (1965) geeft een overzicht van de snelheden die kunnen worden bereikt in de verschillende versnellingen

van een aantal machines. Door omrekening van deze gegevens kunnen de gemiddelde snelheden (heen en terug) worden berekend (zie tabel 4).

TABEL 4. Gemiddelde snelheden in m/sec van een aantal bulldozers (heen en terug) zonder koppelomvormer (Caterpillar, 1965).

Type	Heen 1e versnelling terug 2e versnelling	Heen 2e versnelling terug 4e versnelling
D9	0,94	-
D8 H	0,94	1,22
D7 E	1,16	1,70
D6 C	1,16	1,64
D6 B	1,39	2,03
D4 D	1,39	1,70
Type	*Forwards 1st gear backwards 2nd gear*	*Forwards 2nd gear backwards 4th gear*

TABLE 4. *Average speed in m/sec of various bulldozers without powershift (forward and backward) (Caterpillar, 1965).*

Voor de berekening van de prestatie van een bulldozer moet de capaciteit van het blad ('bladinhoud') bekend zijn. Deze bladinhoud wordt door KÜHN (1956) berekend met:

$$b_b = F_{100}\, f_c\, f_b\, e$$

of:

$$b_b = {}^1/_2\, h^2\, b\, f_c\, f_b\, e \qquad (20)$$

waarin:

b_b = de nuttige lading die kan worden beschouwd als de bladinhoud van de bulldozer (losse m^3)

F_{100} = de theoretische bladinhoud wordt gesteld op de inhoud van een rechthoekig prisma met ribben ter lengte van het bulldozerblad (b). De doorsnede is een gelijkbenige driehoek met lengte van de rechthoekszijden ter grootte van de bladhoogte (h) (fig. 3)

FIG. 3. Bladvulling bij bulldozers.
h = bladhoogte, b = bladlengte (Kühn, 1956).

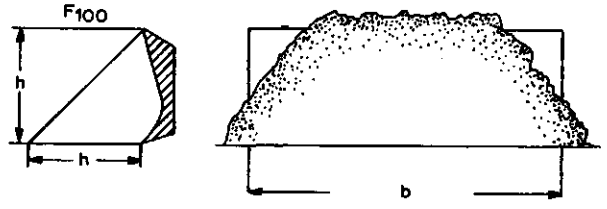


FIG. 3. *Blade capacity of bulldozers.*
h = bladeheight, b = bladelength (Kühn, 1956).

f_c = faktor voor verrekening van de uitlevering van grond en mate van vulling van het blad afhankelijk van grondsoort ($0{,}7 < f_c < 1{,}5$)

f_b = correctiefaktor op de bladbreedte. Deze faktor is ingevoerd om kantverliezen te verdisconteren. De faktor is o.a. afhankelijk van de grootte van de zijborden die op een blad kunnen zijn aangebracht en de ‚graafdiepte' ($f_b \leqslant 1$). Indien twee of meer bulldozers gelijktijdig vlak naast elkaar werken, kan de bladvulling van de afzonderlijke werktuigen met 10–15% worden verhoogd.

e = faktor voor de bladvorm.

NICHOLS (1955) berekent de bladvulling met de empirische formule:

$$b_b = 1{,}21\ (1{,}1\ h)^2\ {}^2/_3\ b \qquad (21)$$

Voor de omrekening in de hoeveelheid grond in natuurlijke ligging – de zogenoemde vaste m^3 – moet de gevonden waarde worden vermenigvuldigd met een correctiefaktor (faktor < 1).

CATERPILLAR (1965) geeft de bladinhoud van een bulldozer afhankelijk van het type. In tabel 5 zijn enige waarden voor de verschillende typen gegeven. Om de vaste m^3 te bepalen moeten de waarden volgens de instructies van CATERPILLAR worden gecorrigeerd met een laadfaktor (faktor < 1).

TABEL 5. Bladinhoud van verschillende bulldozers (Caterpillar, 1965).

Type	Pk	Bladvulling (losse m^3)
D9 GS	310 aan trekhaak *(on drawbar)*	8,0
D8 HS	185 aan trekhaak *(on drawbar)*	6,0
D7 ES	128 aan trekhaak *(on drawbar)*	4,3
D6 CS	97 aan trekhaak *(on drawbar)*	3,2
D6 BS	75 aan trekhaak *(on drawbar)*	2,8
D4 DS	52 aan trekhaak *(on drawbar)*	1,7
Type	*Hp*	*Blade capacity (loose m^3)*

TABLE 5. *Blade capacity of various bulldozers (Caterpillar, 1965).*

De bladinhoud van een bulldozer, berekend met de formule van KÜHN (1956) is ongeveer de helft van de berekende bladinhoud volgens de formule van NICHOLS (1955). De bladinhouden voor de bulldozertypen D9, D8 en D7, berekend met de formule van NICHOLS (1955) liggen ca. 20% hoger dan de bladinhouden voor deze bulldozertypen volgens CATERPILLAR (1965) (tabel 5); voor de bulldozertypen D6 en D4 liggen de berekende bladinhouden ca. 15% lager dan de in tabel 5 aangegeven waarden.

Voor de kostenberekening van het grondverzet met een bulldozer worden de

bladinhoud, snelheid, schakeltijd en kosten van het werktuig als gegevens ingebracht. Het aantal vrachten, dat nodig is om een bepaalde hoeveelheid grond van een afgraving naar een ophoging te brengen, wordt bepaald door de hoeveelheid grond te delen door de bladinhoud van de bulldozer. Het quotiënt is naar boven afgerond tot een geheel getal. Het aantal vrachten wordt met één verhoogd om de 'morsgrond' te verdisconteren. De benodigde uitvoeringstijd om de grond over een bepaalde afstand te transporteren is berekend met:

$$T_b = (\frac{M}{b_b} + 1)(\frac{U}{v} + t_s) \qquad (22)$$

waarin:
T_b = uitvoeringstijd voor bulldozer

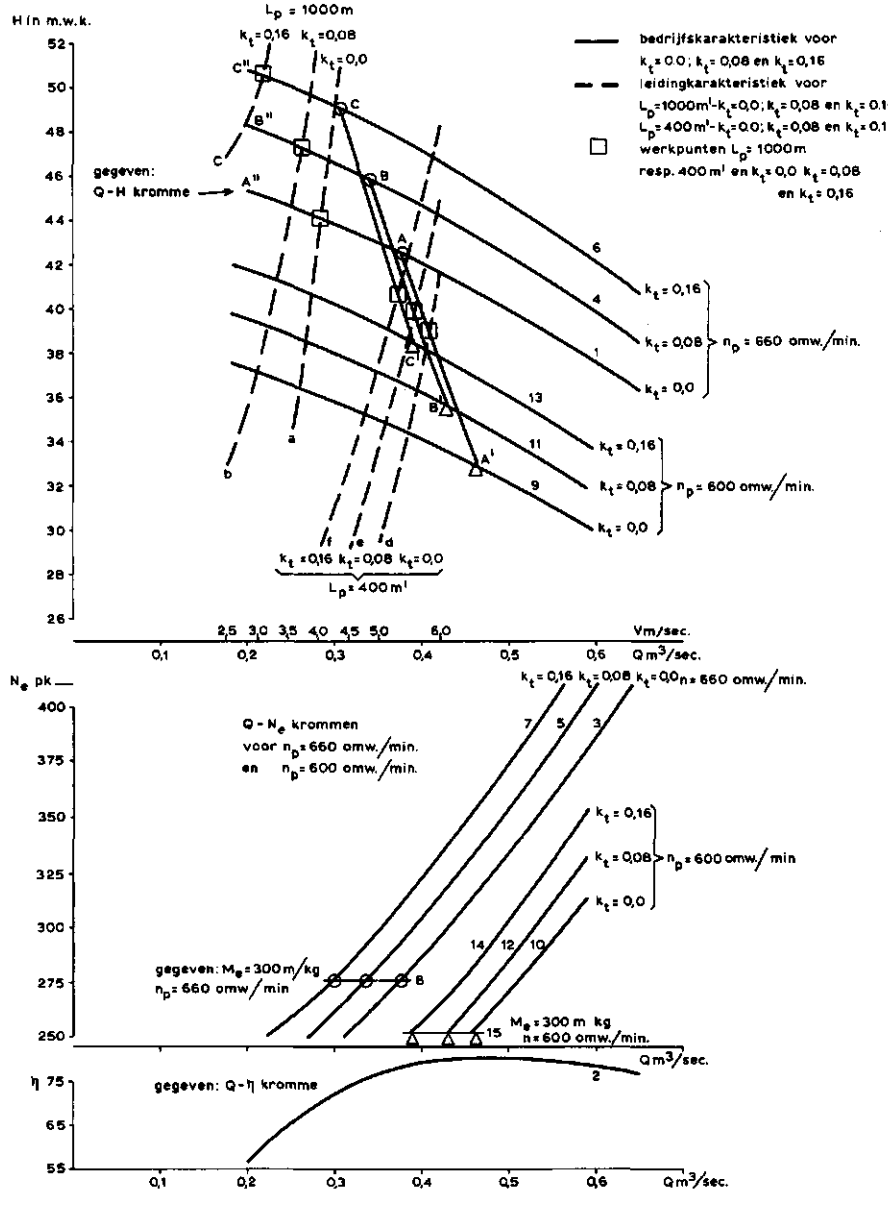
De kosten worden bepaald door de uitvoeringstijd te vermenigvuldigen met de kosten per tijdseenheid. De machinegegevens van de bulldozers, zoals die in het onderzoek zijn opgenomen, zijn gedeeltelijk berekend, deels overgenomen uit de literatuur en deels in het terrein gemeten en geschat.

3.2.2. *Hydraulisch grondverzet*

Het transport van vaste stoffen door een buisleiding, waarbij gebruik wordt gemaakt van een draagvloeistof, is reeds lang bekend. De stoffen die worden vervoerd variëren sterk in soortelijk gewicht en de afstanden waarover de stoffen worden vervoerd kunnen aanzienlijk zijn (FÜHRBÖTER 1961). Als transportmedium wordt in de meeste gevallen water gebruikt waaraan in sommige gevallen oplosbare stoffen worden toegevoegd om het soortelijk gewicht te verhogen (DETTMERS 1963). Bij het hydraulisch grondverzet wordt meestal gebruik gemaakt van een drijvende machine – de zuiger – met als hoofdonderdelen casco, zuigbuis, motor, pomp en persleiding. In het algemeen worden dieselmotoren en centrifugaalpompen gebruikt.

De zuigwerking van de pomp veroorzaakt aan de mond van de zuigbuis een stroming van het water in de grond en in de omgeving van de zuigmond. De grond, die door deze stromingen wordt losgemaakt, wordt door het water naar de mond van de zuigbuis gebracht en verder door de buisleiding getransporteerd. Grondsoorten die weinig samenhang vertonen kunnen zonder hulpmiddelen door de stroming worden meegenomen. Gronden met een grote cohaesie, zoals klei en keileem, moeten eerst worden losgemaakt met mechanische of hydraulische hulpmiddelen, voordat zij kunnen worden getransporteerd. In tegenstelling tot de, in de voorgaande hoofdstukken behandelde, werkhandelingen van het materieel voor het droge grondverzet, is bij het hydraulisch grondverzet geen werkcyclus voor het ingezette materieel te onderkennen. Het materieel is nagenoeg stationair en er wordt continu een stroom grond getransporteerd. Het transport van de grond is, nadat het materieel is geïnstalleerd, arbeidsextensief en de organisatie van het transport is minder veeleisend dan bij het droge grondverzet (ANDREAE, 1972). Een wijziging in de werksituatie, met

name een verandering van ontgravingspunt en transportroute, is echter door het stationaire karakter van het materieel niet direct te verwezenlijken. Ten opzichte van het droge grondverzet zijn de kosten voor de installatie van het materieel en de voorbereiding van het werk hoog (MIJNLIEFF en BUSSER 1970, ANDREAE 1972).



De werking van het hydraulisch grondverzet is grafisch in fig. 4 weergegeven (MIJNLIEFF en BUSSER 1970, 1973, DE BREE 1972). Hierin is de interactie geschetst tussen een combinatie van een motor en pomp enerzijds (bedrijfskarakteristiek) en de leidingweerstand (leidingkarakteristiek) anderzijds. De basis van de bedrijfskarakteristiek wordt gevormd door de Q-H kromme van een pomp (pompkarakteristiek). De Q-H kromme geeft het verband aan tussen het debiet Q van een pomp (m^3/sec) en de hiervoor benodigde druk, de manometrische opvoerhoogte H. De manometrische opvoerhoogte wordt meestal in meters waterkolom (m.w.k.) gegeven. De pompkarakteristiek wordt in het algemeen empirisch bepaald voor water. Het toerental van de pomp wordt bij deze bepaling constant gehouden. De bedrijfskarakteristiek van een combinatie van een motor en een pomp kan met behulp van een aantal gegevens over de motor en de pomp worden berekend. De gegevens hebben o.a. betrekking op:

- Q-H lijn van de pomp voor water (lijn 1)
- rendement (η) van de pomp bij verschillende debieten (Q-η kromme, lijn 2)
- door de motor maximaal te leveren vermogen op de as (koppel) of maximaal toerental
- minimaal toelaatbaar toerental

Voor elk punt van de Q-H lijn kan het benodigde vermogen (N_e) worden berekend en de Q-N_e lijn worden bepaald (lijn 3).

De invloed van de te transporteren grondsoort en de concentratie van de grond in de vloeistof (verhoging van het soortelijk gewicht van het mengsel) op de bedrijfskarakteristiek komt ondermeer tot uiting in een verhoging van de manometrische opvoerhoogte (in m.w.k.).

Met behulp van de door FÜHRBÖTER (1961) empirisch bepaalde formules kunnen voor mengsels van zand en water met verschillende concentraties zand de bijbehorende Q-H lijnen (4 en 6) en Q-N_e lijnen (5 en 7) worden berekend. Bij deze berekeningen wordt uitgegaan van de transportconcentratie (k_t) d.w.z. de verhouding tussen het debiet aan vaste stoffen en het totale debiet. Het maximaal toelaatbare vermogen bij een bepaald toerental wordt in de figuur aangegeven met de lijn 8. Voorbij het punt waar het maximaal toelaatbare vermogen wordt bereikt kan de machine worden ingesteld op constant koppel. Voor andere toerentallen kunnen de bijbehorende punten van de Q-H lijnen, uitgaande van de gegeven Q-H lijn worden berekend (ROORDA en VERTREGT 1963, MIJNLIEFF

FIG. 4. Relatie tussen opvoerhoogte (H), vermogen (N_e), rendement (η) en debiet (Q) van een motor-pomp-combinatie bij verschillende toerentallen en concentraties van een vaste stof in een vloeistof en het verband tussen de drukhoogteverliezen (H) en het debiet (Q) voor een tweetal persleidingen bij verschillende concentraties van een vaste stof in een vloeistof.
L_p = lengte persleiding, k_t = concentratie, n_p = toerental, M_e = koppel.

FIG. 4. *Relation between total manometric head (H), shaft capacity (N_e), efficiency (η) and discharge (Q) of engine-pump combination for various numbers of revolutions and concentrations of a solid in liquid suspension and the relation between total loss in head (H) and capacity for two discharge pipes and various concentrations of a solid in a liquid suspension.*
L_p = *length of discharge pipe*, k_t = *concentration*, n_p = *number of revolutions*, M_e = *torque*.

en BUSSER 1970, DE BREE 1972). In de figuur zijn de lijnen 9, 11, 13 en 10, 12 14 respectievelijk de Q-H en Q-N_e lijnen bij een lager toerental. Het maximaal toelaatbare vermogen bij dit toerental wordt door de lijn 15 gegeven.

De snijpunten van de lijnen 8 en 15 met de Q-N_e lijnen kunnen worden overgebracht naar de overeenkomstige Q-H lijnen. In het Q-H diagram ontstaan zodoende de bedrijfskarakteristieken voor de pomp en motor onder verschillende omstandigheden. Achtereenvolgens geven de lijnen A″–A–A′, B″–B–B′ en C″–C–C′ de bedrijfskarakteristieken voor een pomp en motor voor schoon water, voor een mengsel met een transportconcentratie van ca. 0,08 en een mengsel met een transportconcentratie van ca. 0,16.

In fig. 4 zijn tevens een aantal leidingkarakteristieken getekend voor twee afstanden en de overeenkomstige concentraties, waarvoor de bedrijfskarakteristieken zijn berekend. Hieruit komt naar voren, dat de leidingkarakteristieken a, b en c de bedrijfskarakteristieken snijden (werkpunten) in het gebied waar de motor en pomp bij constant toerental werken. De werkpunten voor de leidingen d, e en f liggen in het gebied waar de machinecombinatie onder constant koppel werkt. Voor de desbetreffende werkpunten moet worden nagegaan of de kritische snelheid niet wordt onderschreden; indien dit het geval is, bezinkt de vaste stof en treedt het zogenoemde verzanden van de leiding op. De kritische snelheid wordt gedefinieerd als de gemiddelde stroomsnelheid waarbij alle vaste stoffen nog juist in beweging zijn hetzij zwevend, springend of glijdend. Deze snelheid kan optreden bij alle vloeistof-vaste stof mengsels waar de vaste stof een hoger soortelijk gewicht heeft dan de vloeistof. Een verhoging van het soortelijk gewicht van de vloeistof leidt tot een verlaging van de kritische snelheid en een toename van de drukverliezen in de leidingen; dit laatste kan worden gecompenseerd door een verlaging van de transportsnelheid, omdat de waarde van de kritische snelheid is verlaagd.

DETTMERS (1963) beschrijft het hydraulisch transport van vaste stoffen met een lager soortelijk gewicht dan zand. Het bleek dat de geconstateerde afname van de kritische snelheid goed overeenkwam met de, door FÜHRBÖTER (1961) opgestelde, empirische vergelijking indien de soortelijke gewichten van deze stoffen in de vergelijking werden verdisconteerd. Verhoging van het soortelijk gewicht van de vloeistof leidde tot gelijkluidende resultaten.

Op basis van onderzoekingen van GIBERT (1960), STEPANOFF (1965) en DETTMERS (1963) over het transport van mengsels van water en vaste stof (o.a. betreffende vaste stof deeltjes met diameters tot 150 μ) stellen MIJNLIEFF EN BUSSER (1973) dat de fracties van de grond van 0–50 μ en 50–150 μ een bijdrage leveren in het soortelijk gewicht van de draagvloeistof, omdat deze fracties bij een voldoende stroomsnelheid van het water een homogeen mengsel vormen. Volgens GIBERT (1960), STEPANOFF (1965) en DETTMERS (1963) vertonen homogene mengsels van water en kleine vaste stof deeltjes dezelfde eigenschappen bij het verpompen als vloeistoffen met een hoger soortelijk gewicht dan water.

Voor de berekening van de prestatie per tijdseenheid ontwikkelden MIJNLIEFF EN BUSSER (1973) een programma op basis van de hierboven beschreven werking van het hydraulisch grondverzet. Hierin wordt de prestatie per tijdseenheid

bepaald door de Q-waarde van het snijpunt van de relevante leiding- en bedrijfskarakteristiek te vermenigvuldigen met de transportconcentratie k_t van de deeltjes, die snel bezinken. Aangenomen wordt dat de fractie 0–50 μ (leem) met het water wordt afgevoerd. Bij de prestatiebepaling moet het poriënvolume van de grond na het bezinken in beschouwing worden genomen om de hoeveelheden in de zogenoemde 'vaste m^3' om te rekenen.

In formule:

$$Q_p = Q\, k_{t2,3}\, \frac{100}{100-pv} \qquad (23)$$

waarin:

Q_p = productie in gestort zand (inclusief poriënvolume) ($m^3\ sec^{-1}$)
Q = debiet van het mengsel ($m^3\ sec^{-1}$)
pv = poriënvolume in %
$k_{t2,3}$ = transportconcentratie van de fracties 50–150 μ en 150–2000 μ.

De tijd die nodig is om een gegeven hoeveelheid grond over een bepaalde afstand te transporteren is met behulp van deze formule te berekenen.

4. TOEPASSING VAN KOSTENMINIMALISERING EN OPTIMALE MACHINEKEUZE

4.1. Beschrijving van het uit te voeren werk

Als voorbeeld van de procedure voor de bepaling van de machinekeuze voor een bepaald werk is de uitvoering van een kavelinrichtingsplan gekozen. Het voorbeeld is zodanig opgezet, dat de bestaande situatie een combinatie bevat van een aantal facetten van het terrein (maaiveldsligging, topografie en perceelsscheidingen) zoals die in ruilverkavelingsgebieden voorkomen. In het betreffende gebied (fig. 5) van ca. 30 ha liggen 20 percelen met een gemiddelde oppervlakte van ca. 1,5 ha. De percelen zijn van elkaar gescheiden door sloten; de ligging van het maaiveld van de afzonderlijke percelen kan worden beschreven met vlak (perceelsnummers 1, 2, 3, 4, 5, 8 en 9), tonrond (perceelsnummers 10 t/m 20) en onegaal (perceelsnummers 6 en 7). Bij de opstelling van het plan voor de herinrichting van dit agrarisch gebied is zoveel mogelijk aansluiting gezocht bij de diverse ontwerpcriteria die in de praktijk worden gehanteerd voor de maaiveldsligging, de perceelsgrootte en de perceelsvorm. Als voorwaarde is gesteld dat de O-W sloot, die het gehele gebied doorsnijdt, moet worden gehandhaafd.

Het plan (fig. 6) voorziet, door dempen van een aantal sloten, in het samenvoegen van de 20 percelen tot 6 percelen met een gemiddelde grootte van ca. 5 ha en in het egaliseren van een aantal percelen. Voor de winning van grond mogen bij het droge grondverzet enkele te handhaven sloten worden verruimd en mag bij de egalisatie van de percelen grond worden gewonnen ten behoeve van het dempen van sloten. Verder dienen twee nieuwe sloten te worden gegraven. De hierbij vrijkomende grond dient te worden gebruikt voor het dempen van de overtollige sloten. Bij het hydraulisch grondverzet dient de grond centraal te worden gewonnen in een zandput buiten het gebied. Omdat wordt uitgegaan van verschillende winningsmogelijkheden van de grond, zijn twee plannen ontworpen nl. voor het droge en voor het hydraulisch grondverzet. De plannen zijn voor wat betreft de figuratie aan elkaar gelijk, maar wijken in grondbalans, transportplan, slootinhouden en maaiveldsligging van elkaar af.

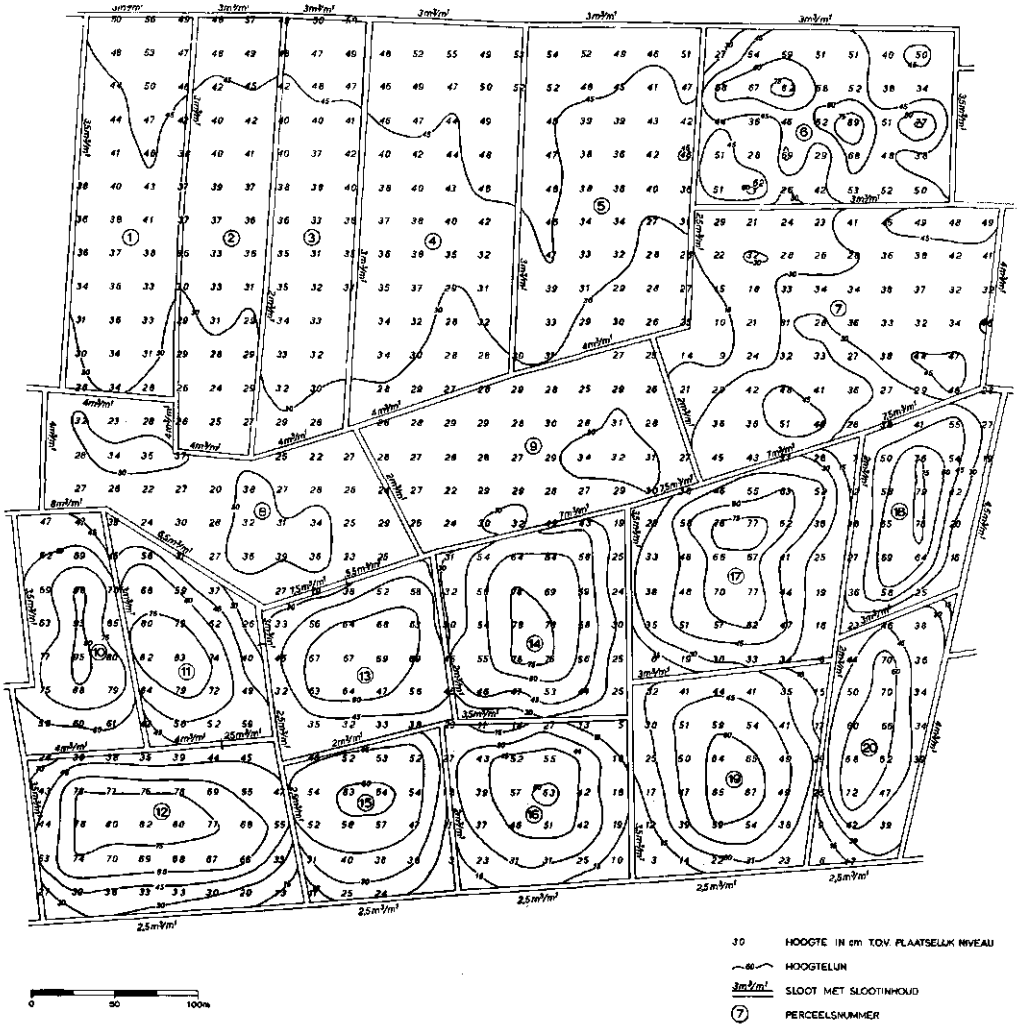
4.2. Plan voor droog grondverzet

4.2.1. *Voorwaarden*

Voor het droge grondverzet worden voor de diverse percelen ten aanzien van de mogelijke grondwinning uit het terrein, de nieuwe maaiveldsligging en de transportmogelijkheden over het terrein de volgende voorwaarden geformuleerd (fig. 5):

- de maaiveldsligging van de percelen 1 t/m 5, 8 en 9 mag niet worden gewijzigd. Het transport van de grond uit de te verruimen en/of te graven sloten dient langs de perceelsranden te geschieden

FIG. 5. Bestaande terreinsituatie. Slootinhouden afgerond op 0,5 m^3/m^1.



FIG, 5. *Actual situation of site. Capacities of ditches rounded-off to 0,5* m^3/m^1.

- het maaiveld van de percelen 6 en 7 moet vlak en horizontaal worden. Indien nodig mag grond worden afgevoerd naar de te dempen sloten ten noorden van de O-W sloot.
- het maaiveld van de percelen 10, 11 en 12 dient zodanig te worden opgeleverd dat geen ingesloten laagten noch ingesloten gedeelten van rijen voorkomen[2].

[2] Een ingesloten gedeelte van een rij kan optreden bij gewassen, die op een rug worden verbouwd (b.v. aardappelen). Indien de rij (tussen twee ruggen) niet over de volle lengte kan afwateren ontstaan één of meer ingesloten gedeelten.

FIG. 6. Nieuwe terreinsituatie. Aangegeven is de situatie zoals die wordt gerealiseerd met het droge grondverzet. Indien het plan met het hydraulisch grondverzet wordt uitgevoerd, ligt het maaiveld van de percelen 6, 7, 10, 11, 12, 17, 18, 19 en 20 ca 5 cm per punt hoger dan in de figuur is aangegeven. De slootinhoud van de te handhaven sloten worden niet gewijzigd; de slootinhouden zijn afgerond op 0,5 m^3/m^1.

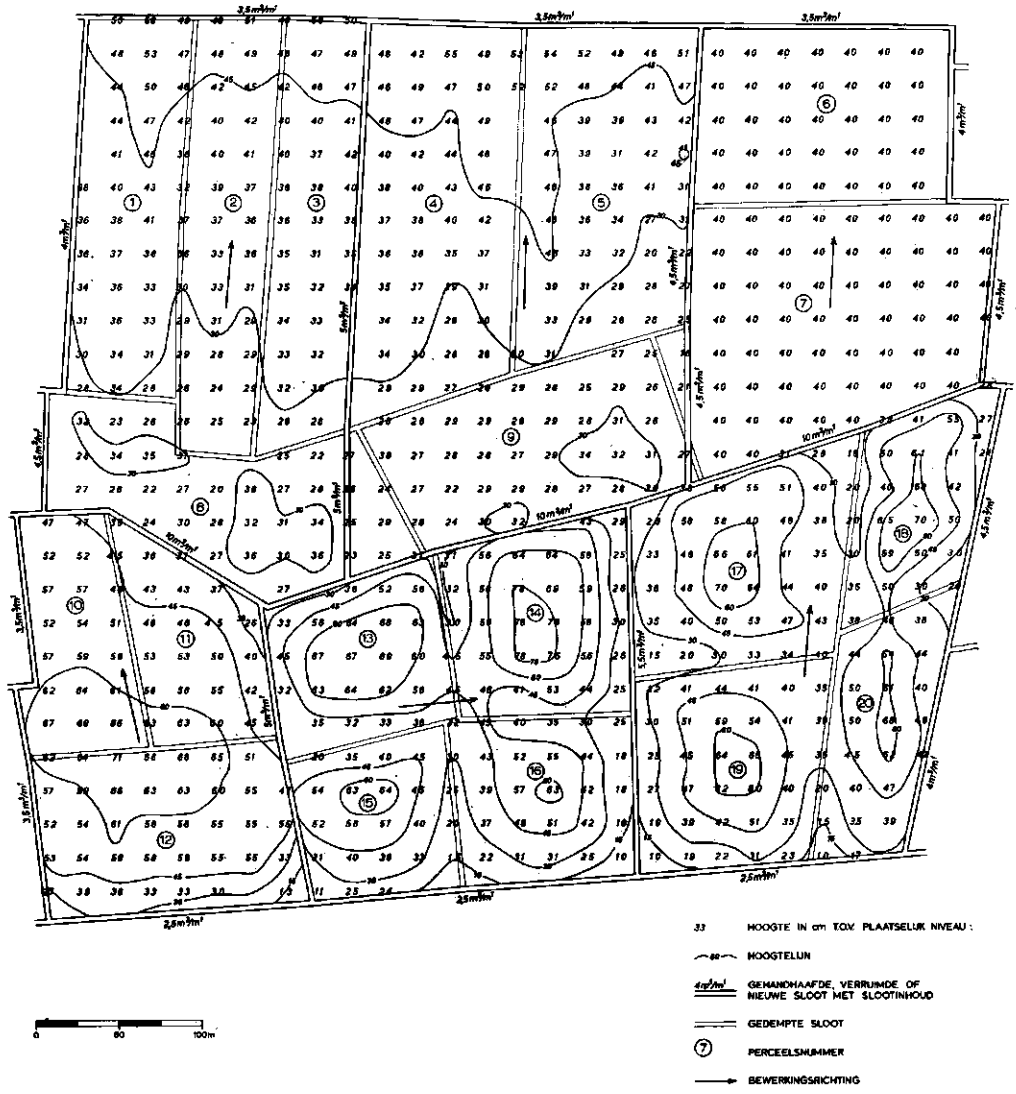


FIG. 6. *New situation of site. This situation will exist after dry earthmoving. In case of hydraulic earthmoving the surface of sections 6, 7, 10, 11, 12, 17, 18, 19 and 20 will be about 5 cm per point higher than indicated in the figure. Ditch capacities of the remaining ditches will not be changed; ditch capacities rounded-off to 0,5 m^3/m^1.*

Uit de percelen mag grond worden gewonnen en afgevoerd naar te dempen sloten en/of ophogingen ten zuiden van de O-W sloot

- de maaiveldsligging van de percelen 13 t/m 16 mag geen ingesloten laagten vertonen. De oorspronkelijke maaiveldsligging dient zoveel mogelijk te worden gehandhaafd. Het transport over de percelen moet worden vermeden; de benodigde grond voor het dempen van sloten moet langs de perceelsranden worden aangevoerd
- voor de maaiveldsligging van de percelen 17 t/m 20 geldt het gestelde voor de percelen 13 t/m 16. Uit het terrein mag wel grond worden gewonnen en afgevoerd.

4.2.2. *Grondbalans*

Voor de berekeningen van de hoeveelheid grond die moet worden verzet, is uitgegaan van een hoogtekaart van het terrein met een ruitennet van 20 bij 20 m. De hoeveelheid grond die vrijkomt uit de te verruimen of te graven sloten is bij de berekening verdeeld over de snijpunten van het ruitennet met de hartlijnen van de sloten. Per snijpunt is de vrijkomende hoeveelheid grond berekend door de halve afstand naar het voorgaande en volgende snijpunt te vermenigvuldigen met de relevante hoeveelheid per strekkende meter. De grond die nodig is om een sloot te dempen is op dezelfde manier berekend. De grondverzetsberekeningen zijn met de hand uitgevoerd. Het resultaat van de berekeningen is een kaart met de ophogingen c.q. aanvullingen en afgravingen (fig. 7). De berekeningen zijn zodanig uitgevoerd, dat een gesloten grondbalans is verkregen. In tabel 6 is de grondbalans van het plan opgenomen. Hierbij is de slootinhoud voor de helft aan de aanliggende percelen toegerekend. De lengte van de te dempen, te graven of te verruimen sloten is op 5 m, de oppervlakte op 0,1 ha afgerond.

4.2.3. *Transportplan*

Omdat het aantal punten van de ophogingen c.q. aanvullingen en afgravingen (respectievelijk + en − punten) te groot bleek te zijn (ca. 450) om in één keer het transportplan voor het gehele gebied door de computer te laten berekenen, moest een kunstgreep worden toegepast. Deze bestond uit het reduceren van het aantal + en − punten door voor beide categorieën afzonderlijke punten samen te voegen en de hoeveelheid te situeren in het zwaartepunt van de groep. Dit proces is voortgezet tot het totaal gereduceerde aantal punten door de computer kon worden verwerkt (ca. 50). Daarna is het transportplan tussen de zwaartepunten berekend met behulp van een computerprogramma van Floyd, Ford en Fulkerson (Bos 1969, Busser en Mijnlieff 1972). Op basis van deze berekeningen is het gebied met de hand in een aantal deelgebieden gesplitst zodanig dat binnen een deelgebied een gesloten grondbalans werd verkregen en het totaal aantal oorspronkelijke + en − punten de capaciteit van de computer niet overschreed.

Per deelgebied werd met het eerder genoemde programma de verbindingslijnen tussen de + en − punten bepaald. In de fig. 8 en 9 zijn de verbindingslijnen tussen de + en − punten voor een aantal percelen getekend. Per verbin-

dingslijn is de hoeveelheid grond aangegeven die via deze transportroute moet worden verplaatst. Opgemerkt wordt dat voor bepaalde percelen voor de duidelijkheid de herkomst- en bestemmingspunten voor de vrijkomende grond uit sloten direct zijn verbonden. Zo lopen de verbindingslijnen in de percelen, weergegeven in fig. 8 feitelijk langs de perceelsranden. Hiertoe zijn in de berekening

FIG. 7. Ophoging (+) en afgravingen (−).

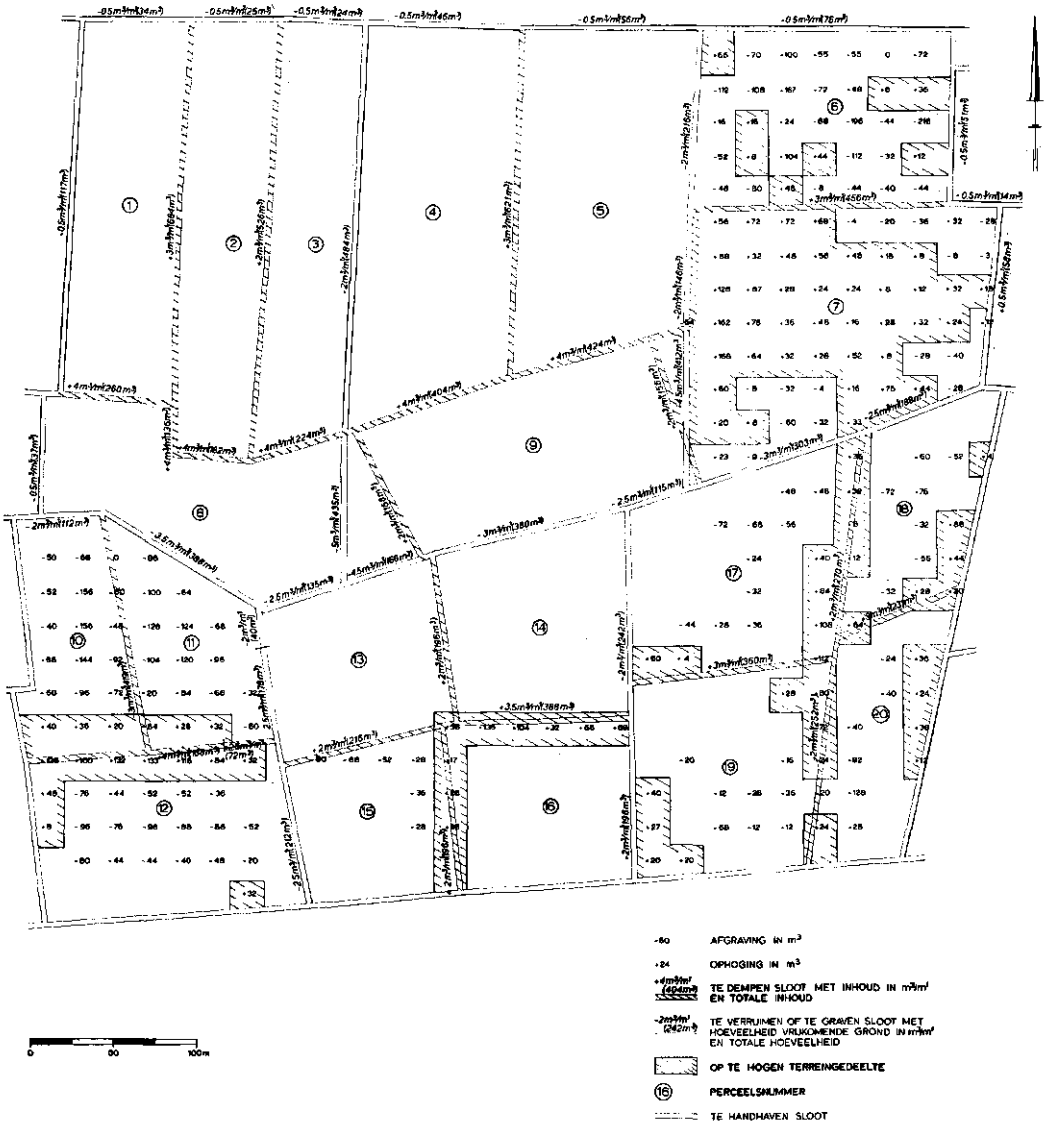


FIG. 7. *Fills (+) and cuts (−).*

TABEL 6. Grondbalans van het plan voor droog grondverzet.

	Grondwinning						Grondbehoefte			
	sloten				terrein		sloten		terrein	
	graven		verruimen		ontgraven		dempen		ophogen	
	m¹	m³	m¹	m³	ha	m³	m¹	m³	ha	m³
1	–	–	300	151	–	–	295	472	–	–
2	–	–	50	25	–	–	570	764	–	–
3	–	–	290	266	–	–	320	375	–	–
4	–	–	335	288	–	–	310	512,5	–	–
5	–	–	290	301	–	–	315	522,5	–	–
6	–	–	360	235	1,0	2007	150	228	0,3	238
7	60	302	395	390,5	0,8	397	150	370	1,6	1955
8	90	435	330	438,5	–	–	285	485	–	–
9	30	110	175	247,5	–	–	385	576	–	–
10	–	–	50	56	0,6	1182	210	364,5	0,1	96
11	–	–	200	303	0,6	1156	230	324,5	0,1	144
12	–	–	85	106	0,7	1032	150	270	0,4	821
13	–	–	205	260,5	–	–	205	206	–	–
14	–	–	248	311	–	–	210	292	–	–
15	–	–	85	106	0,2	272	205	206	0,2	136
16	–	–	100	98	–	–	210	292	0,2	456
17	–	–	270	330	0,4	456	255	315	0,3	364
18	–	–	75	94	0,3	380	210	250,5	0,3	260
19	–	–	100	98	0,3	204	250	306	0,3	427
20	–	–	–	–	0,3	372	205	241,5	0,2	140
Tot. *Total*	180	847	3943	4105	5,2	7458	5120	7373	4,0	5037

Totaal grondwinning (m³) 12410
Total earth removal (m³)

Totaal grondbehoefte (m³) 12410
Total earth requirements (m³)

Totaal/ha										
	6	26	131	137	0,17	249	171	246	0,13	168
Total/ha										

Totaal grondwinning/ha 414
Total earth removal/ha

Totaal grondbehoefte/ha 414
Total earth requirement/ha

	m¹	*m³*	*m¹*	*m³*	*ha*	*m³*	*m¹*	*m³*	*ha*	*m³*
	excavating		*enlarging*		*ground excavating*		*ditches filling up*		*ground filling up*	
	ditches									
	Earth removal						*Earth requirement*			

TABLE 6. *Cut and fill balance for dry earth moving.*

FIG. 8. Verbindingslijnen tussen de ontgravings- en ophogingspunten met transportrichting en hoeveelheden in m^3.

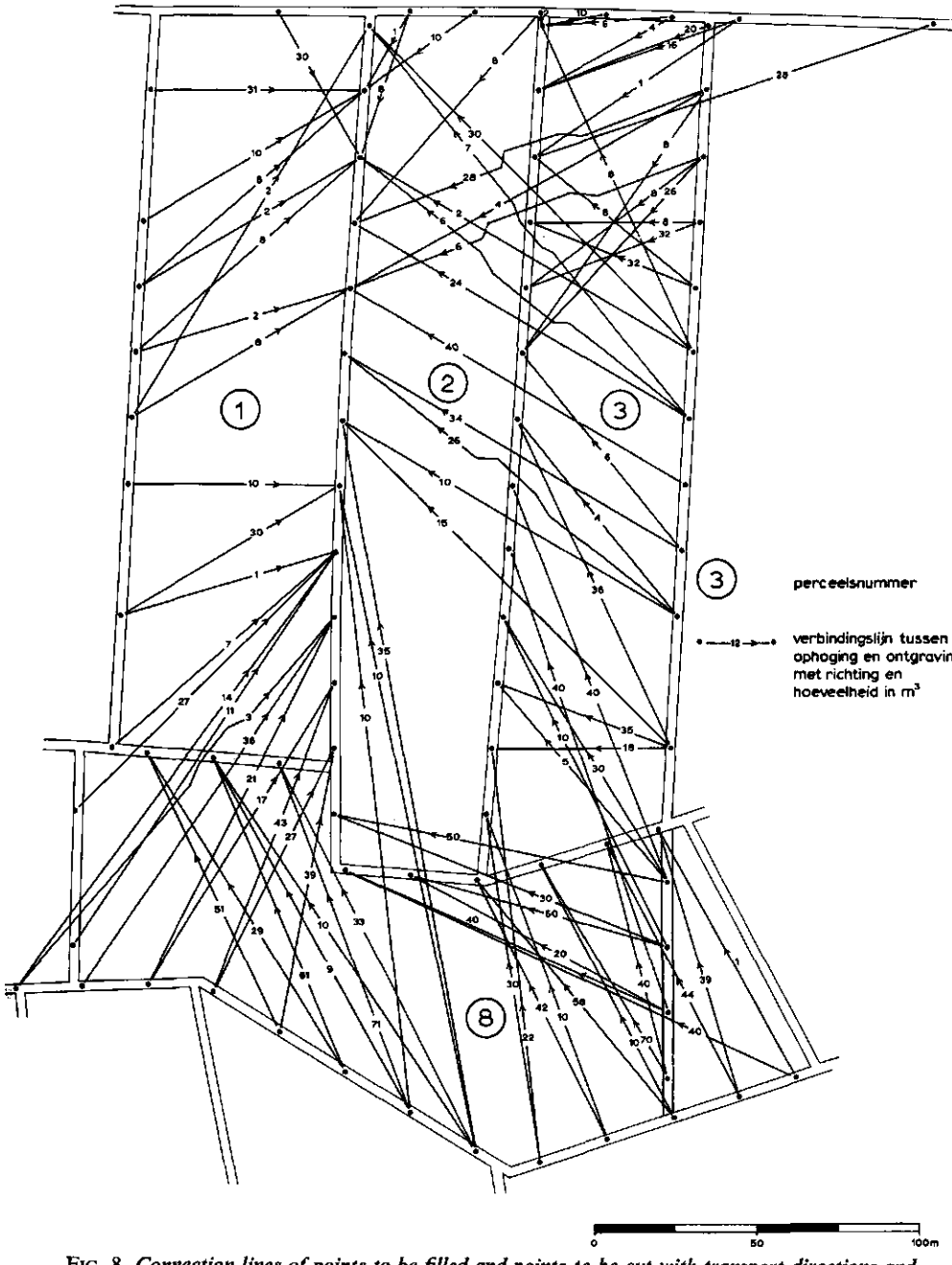


FIG. 8. *Connection lines of points to be filled and points to be cut with transport directions and quantities in m^3.*

FIG. 9. Verbindingslijnen tussen de ontgravings- en ophogingspunten met transportrichting en hoeveelheden in m^3.

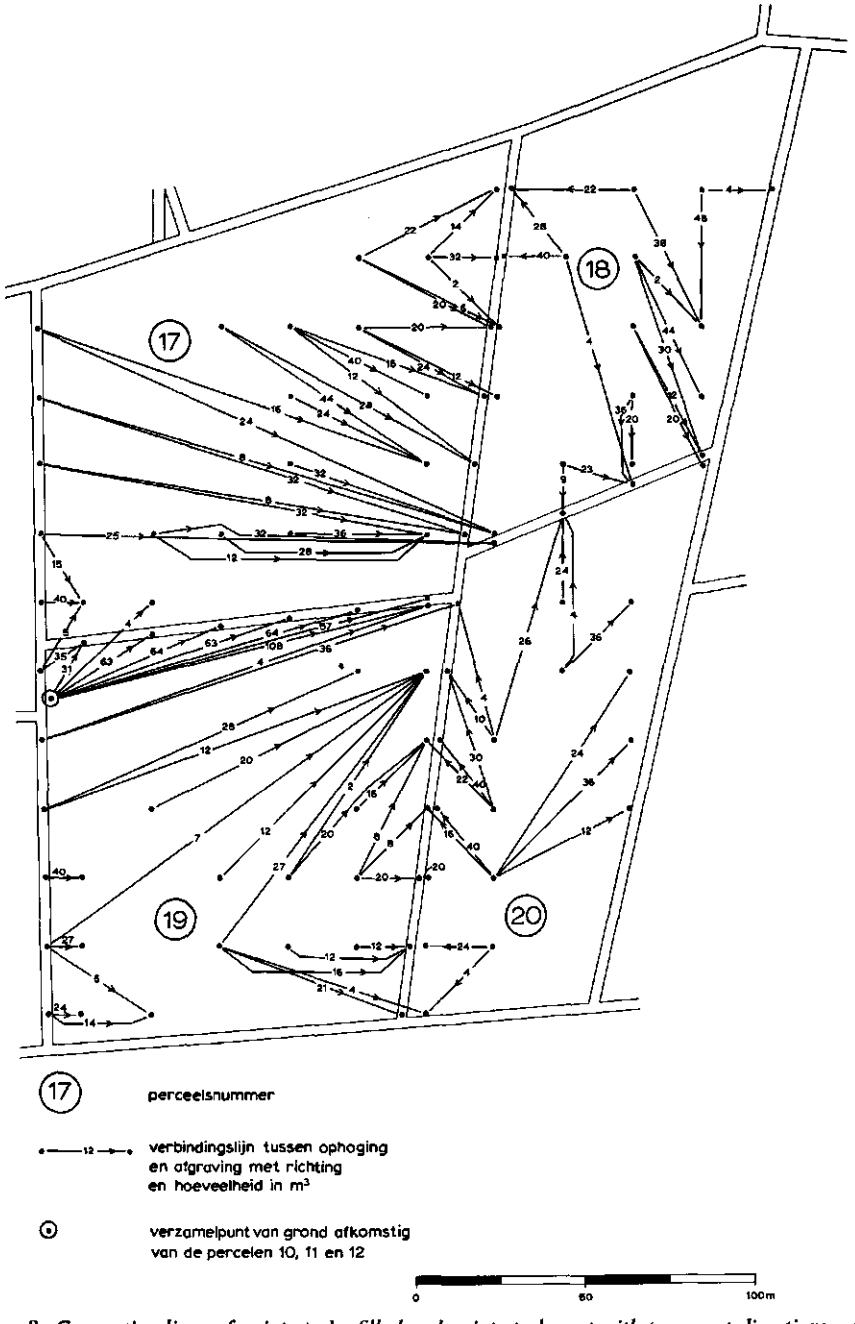


FIG. 9. *Connection lines of points to be filled and points to be cut with transport directions and quantities in* m^3.

zogenoemde dwangpunten opgenomen, waarlangs het transport moet plaatsvinden. Het terrein tussen de sloten wordt dus niet bereden.

Voor de percelen waar een egalisatie wordt uitgevoerd geven de lijnen de directe verbinding aan. Het beeld van de verbindingslijnen is voor egalisaties (zie o.a. fig. 9, gedeelte perceel 17) overeenkomstig het beeld dat met het in de praktijk ontwikkelde systeem voor het bepalen van een transportplan voor egalisaties wordt verkregen (schuifschema) (BUSSER en MIJNLIEFF 1972). Voor het verruimen c.q. graven en dempen van sloten verlopen de verbindingen niet analoog de praktijk, omdat de continuïteit van het graven of dempen van een sloot bij deze verbindingslijnen niet is te realiseren.

4.2.4. *Werkindeling*

Indien er zeer veel verbindingslijnen in een transportplan voorkomen is het vaak wenselijk een aantal lijnen in groepen samen te voegen. Enerzijds omdat bij de berekening van de uitvoeringstijd en -kosten met een computer de beschikbare geheugenruimte beperkt is, anderzijds om te voorkomen dat in het extreme geval zou worden aangegeven dat op één plaats waar grond moet worden ontgraven verschillende machines moeten werken. Bij de groepering van de verbindingslijnen kunnen een aantal criteria worden gehanteerd zoals b.v. een gelijke herkomst en bestemming, de ongeveer gelijke lengten van de verbindingslijnen en de te transporteren hoeveelheid (binnen een groep niet meer dan een zekere hoeveelheid). Tevens kan rekening worden gehouden met een aansluitende ligging van de herkomst en/of bestemmingspunten.

Bij de indeling van de verbindingslijnen in groepen (onderdelen van het werk) is geen rekening gehouden met de volgorde van de verbindingslijnen, zoals die bij de uitvoering van het werk naar voren kan komen. De volgorde wordt o.a. bepaald door de voorschriften van de opdrachtgever, grondsoorten, waterhuishouding en organisatorische redenen (DERKSEN, 1969). Het niet in beschouwing nemen van de volgorde kan er toe leiden dat de plaatsen waar achtereenvolgens grond moet worden ontgraven of worden gestort vrij willekeurig over het project zijn gerangschikt. Bij het dempen van een sloot kan dit b.v. tot gevolg hebben dat modderopsluitingen optreden. Worden bij de groepering van de verbindingslijnen, op basis van de eerder genoemde berekeningen, de ontgravingspunten aansluitend genomen, dan liggen de stortplaatsen verspreid. Voor een vereenvoudigde situatie, met name het graven van een sloot en dempen van een andere sloot, is door MIJNLIEFF (1969) een simulatieproces beschreven waarbij wel rekening wordt gehouden met het aansluitend graven en dempen. Bij deze werkwijze kan wel binnen een groep van verbindingslijnen rekening worden gehouden met de volgorde van uitvoering maar de volgorde van de groepen afzonderlijk blijft ook daar achterwege. Het inbrengen van de volgorde van uitvoering voor een aantal groepen van verbindingslijnen is in principe misschien wel mogelijk maar vereist zeer veel rekenwerk omdat voor het gelijktijdig inzetten van een aantal machines of machinecombinaties voor ieder aantal opnieuw de toewijzing en volgorde moet worden bepaald.

De verbindingslijnen in het onderhavige voorbeeld zijn ingedeeld in 27 groepen

FIG. 10. Herkomstgebieden van de grond voor een aantal groepen van verbindingslijnen (werkonderdelen); de bestemmingspunten zijn niet aangegeven.

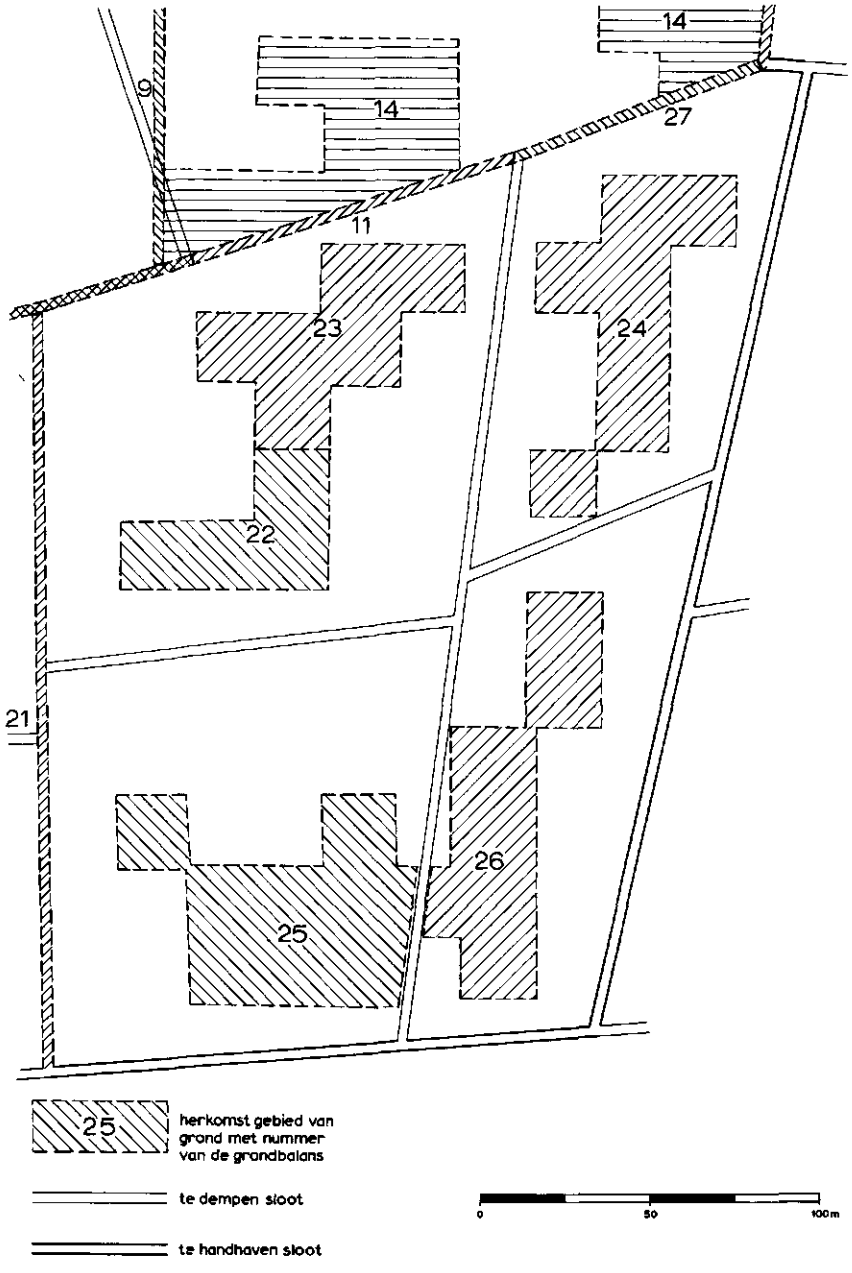


FIG. 10. *Area of cut for a number of groups of connection lines (elements); the points of destination are not indicated.*

TABEL 7. Hoeveelheden en gewogen gemiddelde transportafstanden per werkonderdeel.

Werkonderdeel no.	Hoeveelheid m^3	Afstand m	Werkonderdeel no.	Hoeveelheid m^3	Afstand m
1	128	86	15	1340	51
2	174	166	16	680	37
3	502	219	17	1350	267
4	296	168	18	420	193
5	435	147	19	128	83
6	484	226	20	144	31
7	128	163	21	438	72
8	428	184	22	140	66
9	354	95	23	316	47
10	556	135	24	380	35
11	186	31	25	204	58
12	123	53	26	372	39
13	2067	85	27	300	305
14	337	45			
			Totaal *Total*	12410	
			gewogen gemiddelde *weighted mean*		123 m

Element nr.	*Quantity* m^3	*Distance m*	*Element nr.*	*Quantity* m^3	*Distance m*

TABLE 7. *Quantities and weighted mean transport distances per element.*

(werkonderdelen). De groepen zijn samengesteld uit aaneengesloten herkomstpunten van de grond en meestal verspreid liggende bestemmingspunten (fig. 10). In tabel 7 zijn de hoeveelheden en de gewogen gemiddelde transportafstand per werkonderdeel opgenomen. Per werkonderdeel dienen de verschillende werktuigen of werktuigcombinaties te worden ingezet op de verbindingslijnen en de kosten voor het grondverzet berekend.

4.3. PLAN VOOR HYDRAULISCH GRONDVERZET

De grond nodig voor het dempen van sloten wordt bij het hydraulisch grondverzet gewonnen uit een zandput buiten het object (afstand 500 m). De sloten worden niet ten behoeve van de grondwinning verruimd. De nieuwe sloten worden door een graafmachine gegraven; de hierbij vrijkomende grond wordt in de naastliggende te dempen sloot gestort. De egalisatie van de percelen 6 en 7 wordt met de bulldozer uitgevoerd. Omdat in dit plan grond wordt aangevoerd zal de uiteindelijke hoogteligging van het maaiveld voor de percelen 6, 7, 10, 11, 12, 17, 18, 19, 20 op een ander ca. 5 cm hoger niveau komen te liggen. Met behulp van het algoritme van Prim (hfst. 3.1.2) kan het tracé van de persleiding worden bepaald (fig. 11). Per 100 m^1 leidingvak is de hoeveelheid zand aangege-

ven die daar ter plaatse moet worden gestort. In tabel 8 zijn de hoeveelheden met de afstandsklassen, waarover de grond moet worden getransporteerd, vermeld.

FIG. 11. Leidingtracé en hoeveelheid aan te voeren grond per leidingvak bij het hydraulisch grondverzet.

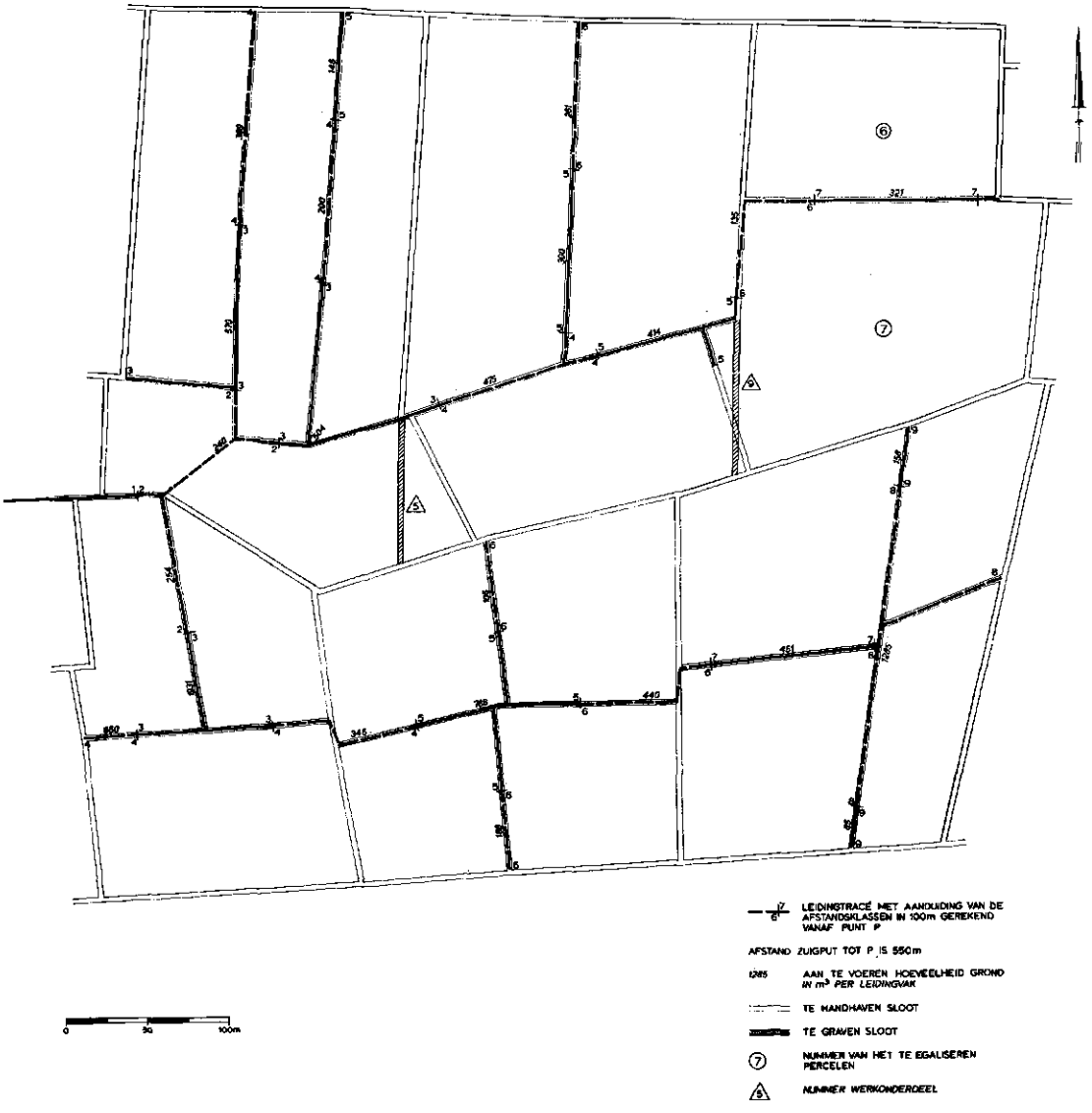


FIG. 11. *Piping alignment and quantity of earth to be supplied per piping section in hydraulic earthmoving.*

TABEL 8. Hoeveelheden (in vaste m^3 inclusief poriënvolume) en afstandsklassen voor het hydraulisch grondverzet.

Hoeveelheid	Afstandsklasse	Gemiddelde afstand
m^3	m	m
0	550 – 650	600
494	650 – 750	700
3005	750 – 850	800
2080	850 – 950	900
1648	950 –1050	1000
1130	1050 –1150	1100
772	1150 –1250	1200
1285	1250 –1350	1300
243	1350 –1450	1400
10657		

Quantity	*Distance class*	*Average distance*
m^3	*m*	*m*

TABLE 8. *Quantities and distance classes for hydraulic moving of earth.*

4.4. MACHINES EN WERKOMSTANDIGHEDEN

Voor de uitvoering van het project is aangenomen dat de in tabel 9, 10 en 11 genoemde typen machines mogen worden ingezet.

Een graafmachine kan met een aantal transportmiddelen van hetzelfde type worden gecombineerd tot een werktuigcombinatie (WtC). Het aantal transportmiddelen varieert van 0 tot en met 6. De WtC's worden aangeduid met een codering, bestaande uit een type graafmachine en een aantal transportmiddelen van een bepaald type. Zo is (0,7 D; 2–3,0 T) een combinatie van een graafmachine van het type 0,7 D met een bakinhoud van 700 l en een tweetal transportmiddelen van het type 3,0 T. Het aantal aangevoerde WtC's van eenzelfde soort wordt vóór de codering vermeld.

De prestaties van de machines worden beïnvloed door de omstandigheden waaronder zij moeten werken. In het voorbeeld worden daarom een aantal situaties ingevoerd, zodanig dat de prestatiebepalende faktoren met 15 % en 30 % afnemen. Als prestatiebepalende faktoren worden bij de graafmachines de bakinhoud en de cyclustijd, voor de transportmiddelen de bakinhoud en de snelheid en bij de bulldozers de bladvulling en de snelheid genomen. De waarden van de prestatiebepalende faktoren van de machines voor verschillende situaties zijn in tabel 12 gegeven.

Bij het uitvoeren van een werk met diverse soorten machines kunnen de omstandigheden op het werk aanleiding geven tot verschillende prestatiebepalende faktoren voor de ingezette machines. In tabel 13 worden een 9-tal situaties ge-

TABEL 9. Gegevens van de graafmachines.

Type	0,6 D	0,7 D	1,1 D	0,4 H	0,5 H	0,8 H
Bakinhoud (m^3) *Bucket capacity (m^3)*	0,6	0,7	1,1	0,4	0,5	0,8
Cyclustijd voor laden (sec) *Cycle time for loading (sec)*	23	25	37	25	25	25
Overslagbereik (m) *Casting distance (m) (2×)*	20	20	25	8	10	12
Cyclustijd bij overdraaien (sec) *Cycle time for twice the casting distance (sec)*	35	38	46	31	31	31
Rijsnelheid (m/sec) *Speed (m/sec)*	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Kosten (f/sec) *Cost (Hfl/sec)*	0,0065	0,0085	0,011	0,008	0,0085	0,01
Aanvoerkosten (f) *Cost of transport to work (Hfl)*	193	207	220	203	206	217

TABLE 9. *Data of excavators.*

TABEL 10. Gegevens van de transportmiddelen.

Type	2,0 T	3,0 T	4,0 T
Bakinhoud (m^3) *Bucket capacity (m^3)*	2,0	3,0	4,0
Snelheid (m/sec) *Speed (m/sec)*	3,0	3,0	3,0
Schakel- en lostijd (sec) *Time for switching and dumping (sec)*	40	40	40
Kosten (f/sec) *Cost (Hfl/sec)*	0,0035	0,004	0,006
Aanvoerkosten (f) *Cost of transport to work (Hfl)*	13	15	22

TABLE 10. *Data of haul units.*

TABEL 11. Gegevens van de bulldozers.

Type	0,8 B	2,0 B	2,8 B
Bladinhoud (m^3) *Blade capacity (m^3)*	0,8	2,0	2,8
Snelheid (m/sec) *Speed (m/sec)*	1,7	1,7	1,7
Schakeltijd (sec) *Time for switching and dumping (sec)*	5	5	5
Kosten (f/sec) *Cost (Hfl/sec)*	0,0065	0,0080	0,0125
Aanvoerkosten (f) *Cost of transport to work (Hfl)*	192	203	235

TABLE 11. *Data of bulldozers.*

TABEL 12. Prestatiebepalende faktoren van de machines bij 100, 85 en 70% van de maximale prestatie;
l = cyclustijd bij laden, o = cyclustijd bij overslaan

Graafmachines	100% (A)		85% (B)		70% (C)	
	bak-inhoud m^3	cyclus-tijd sec	bak-inhoud m^3	cyclus-tijd sec	bak-inhoud m^3	cyclus-tijd sec
0,6 D	0,6	l 23	0,5	l 26,5	0,42	l 30
		o 35		o 40		o 45,5
0,7 D	0,7	l 25	0,6	l 29	0,49	l 32,5
		o 38		o 44		o 49,5
1,1 D	1,1	l 37	0,94	l 42,5	0,77	l 48
		o 46		o 53		o 60
0,4 H	0,4	l 25	0,34	l 29	0,28	l 32,5
		o 31		o 35,5		o 40
0,5 H	0,5	l 25	0,42	l 29	0,35	l 32,5
		o 31		o 35,5		o 40
0,8 H	0,8	l 25	0,68	l 29	0,56	l 32,5
		o 31		o 35,5		o 40
Excavators	*Capa-city of bucket m^3*	*Cycle time sec*	*Capa-city of bucket m^3*	*Cycle time sec*	*Capa-city of bucket m^3*	*Cycle time sec*

Transportmiddelen	100% (a)		85% (b)		70% (c)	
	bak-inhoud m^3	snel-heid m/sec	bak-inhoud m^3	snel-heid m/sec	bak-inhoud m^3	snel-heid m/sec
2,0 T	2,0	3,0	1,7	2,5	1,4	2,1
3,0 T	3,0	3,0	2,5	2,5	2,1	2,1
4,0 T	4,0	3,0	3,4	2,5	2,8	2,1
Haul units	*Capacity of bucket m^3*	*Speed m/sec*	*Capacity of bucket m^3*	*Speed m/sec*	*Capacity of bucket m^3*	*Speed m/sec*

Bulldozers	100% (a)		85% (b)		70% (c)	
	blad-inhoud m^3	snel-heid m/sec	blad-inhoud m^3	snel-heid m/sec	blad-inhoud m^3	snel-heid m/sec
0,8 B	0,8	1,7	0,68	1,45	0,56	1,2
2,0 B	2,0	1,7	1,7	1,45	1,4	1,2
2,8 B	2,8	1,7	2,4	1,45	1,95	1,2
Bulldozers	*Blade-capacity m^3*	*Speed m/sec*	*Blade-capacity m^3*	*Speed m/sec*	*Blade-capacity m^3*	*Speed m/sec*

TABLE 12. *Factors determining output of machines at 100, 85 and 70% of maximum capacity;* l = *cycle time for loading;* o = *cycle time for twice the casting distance.*

TABEL 13. Overzicht van de behandelde situaties naar gelang van de prestaties van de machines.

Situatie	Prestatie in %		
	graafmachines	transportmiddelen	bulldozers
1 (A-a,a)	100 (A)	100 (a)	100 (a)
2 (B-a,a)	85 (B)	100 (a)	100 (a)
3 (C-a,a)	70 (C)	100 (a)	100 (a)
4 (A-b,b)	100 (A)	85 (b)	85 (b)
5 (B-b,b)	85 (B)	85 (b)	85 (b)
6 (C-b,b)	70 (C)	85 (b)	85 (b)
7 (A-c,c)	100 (A)	70 (c)	70 (c)
8 (B-c,c)	85 (B)	70 (c)	70 (c)
9 (C-c,c)	70 (C)	70 (c)	70 (c)
Situation	*excavators*	*haul units*	*bulldozers*
	Output in %		

TABLE 13. *Situations relative to output of machines.*

TABEL 14. Gegevens van de zuigers.

Type 1			Type 2		
Q m^3/sec	H m.w.k.	η	Q m^3/sec	H m.w.k.	η
0,20	45,4	0,56[5]	0,20	60,4	0,56[5]
0,30	43,8	0,72	0,30	58,8	0.72
0,40	42,0	0,79	0,40	57,0	0,79
0,50	40,0	0,81	0,50	55,0	0,81
0,55	38,8	0,80	0,55	53,8	0,80
0,60	37,6	0,78[5]	0,60	52,6	0,78[5]
0,65	36,6	0,77	0,65	51,3	0,77

	Type 1	Type 2
M_e maximaal koppel	380 mkg	590 mkg
M_e *Maximum torque*		
85% maximaal toerental	660 omw/min	660 omw/min
85% maximum number of revolutions	*rev/min*	*rev/min*
Lengte zuigbuis	6 m	6 m
Length of suction pipe		
Diameter zuigbuis	0,35 m	0,35 m
Diameter of suction pipe		
Diameter persleiding	0,30 m	0,30 m
Diameter of discharge pipe		
Afstand pompas onder waterspiegel	0,30 m	0,30 m
Distance centre of pump to water level		

TABLE 14. *Data of suction dredges.*

geven waarmee bij de uitvoering van het gekozen kavelinrichtingsplan rekening wordt gehouden.

Zo wordt situatie (3) gekarakteriseerd met (C-a,a), d.w.z. dat de prestatiebepalende faktoren van de graafmachines tot 70% zijn gedaald, terwijl voor de

transportmiddelen en de bulldozers de prestatiebepalende faktoren op 100% zijn gebleven.

Voor het hydraulisch grondverzet kunnen twee typen zuigers worden ingezet. De gegevens van deze machines zijn in tabel 14 opgenomen.

Bij de berekening van de uitvoeringskosten van het plan voor het hydraulisch grondverzet kan zuigertype 1 worden gecombineerd met een tussenstation. Gesteld wordt, dat dit tussenstation dezelfde kenmerken heeft als de motor-pomp-combinatie van zuiger 1.

Aangenomen wordt dat de grond die moet worden getransporteerd een maatgevende korreldiameter heeft voor de fractie $> 150\ \mu$ van 0,35 mm. Bovendien bevat de grond 5% deeltjes $< 50\ \mu$ en 10% deeltjes van 50–150 μ. Het poriënvolume van de grond op het stort wordt gesteld op 40%. De opvoerhoogte gerekend vanaf de waterspiegel in de zuigput tot het niveau van het stort bedraagt 2 m. De maximale transportconcentratie die kan worden bereikt wordt gesteld op 0,21; een waarde die in de praktijk bij het transport van een zand-watermengsel zelden wordt overschreden (verhouding volume zand-volume water ca. 1:2).

4.5. Resultaten

4.5.1. *Droog grondverzet*

Voor de 27 werkonderdelen werden de uitvoeringstijd en -kosten per werktuig of werktuigcombinatie berekend. In totaal zijn er 117 mogelijkheden in beschouwing genomen teweten:

6 typen graafmachines, 3 typen transportmiddelen; maximaal 6 transportmiddelen	108
6 typen graafmachines (zonder transportmiddel)	6
3 typen bulldozers	3
	117

Deze 117 mogelijkheden worden in het vervolg met WtC aangeduid. Ieder van deze WtC's kan in principe in elk werkonderdeel worden ingezet. Voor het graven en verruimen van sloten is de bulldozer echter uitgesloten.

Voor de berekening van de uitvoeringstijd en -kosten zijn een aantal computer-programma's ontwikkeld (Mijnlieff en Busser 1970). Het programma voor de uitvoering van het werk door graafmachines, al of niet gecombineerd met transportmiddelen, is gebaseerd op de formules 5 en 11 t/m 18. Het programma voor de bulldozer op de formule 22.

Bij de bepaling van de uitvoeringskosten worden de volgende faktoren niet apart in rekening gebracht:

- de aanlooptijd bij het begin van de werkzaamheden (voor elke dag en begin van het werk)
- de persoonlijke verzorging (kan gedeeltelijk binnen wachttijden vallen)

- de calamiteiten
- het onderhoud van het materieel

Deze faktoren kunnen in rekening worden gebracht door het invoeren van een efficiency-faktor, die de berekende zuivere uitvoeringstijd corrigeert.

De resultaten van de berekeningen zijn in een matrix – in dit geval van 117 bij 27 – gerangschikt. In tabel 15 is een gedeelte van een dergelijke matrix gegeven. De hierin opgenomen gegevens worden gebruikt voor de berekening van de minimale kosten voor het grondverzet. In deze matrix kunnen bij verdere verfijning de kosten van voor- en nawerk, voor schadevergoedingen e.d. voor een bepaalde WtC worden ingevoerd.

TABEL 15. Gedeelte van de matrix voor situatie B-b,b (5) van de uitvoeringskosten en -tijd voor de verschillende werktuigcombinaties (WtC) in 27 werkonderdelen.

WtC	1,1 D; 6–3,0 T		1,1 D; 1–4,0 T		1,1 D; 2–4,0 T	
Werk-onderdeel	kosten (f)	tijd (sec)	kosten (f)	tijd (sec)	kosten (f)	tijd (sec)
12	219,56	6273	81,15	10656	141,45	6150
13	3689,60	105417	2984,79	175576	2392,74	104032
14	601,55	17187	463,45	27262	387,55	16850
Element	*cost (Hfl)*	*time (sec)*	*cost (Hfl)*	*time (sec)*	*cost (Hfl)*	*time (sec)*

TABLE 15. *Part of matrix for situation B-b,b (5) of cost of completing a job with various combinations of machines (WtC) in 27 elements.*

Door het toepassen van een optimaliseringsprogramma, in dit geval een aangepaste versie van het algoritme van Land en Doig[3] worden voor een aantal gestelde termijnen i.c. 108 000, 216 000 en 324 000 sec de minimale kosten voor de uitvoering van het werk berekend. Tevens wordt aangegeven welke machines moeten worden ingezet. De berekeningen voor de geheeltallige benadering vergde veel rekentijd (computertijd) door het grote aantal werktuigcombinaties. Daarom werden de berekeningen afgebroken, nadat de eerste geheeltallige oplossing was gevonden.

De berekeningen zijn uitgevoerd met een computer van het Mathematisch Centrum in Amsterdam (X8-Electrologica). In fig. 12 zijn de kosten voor de uitvoering van het werk opgenomen voor 4 termijnen (108 000; 216 000; 324 000 en $\sim$ sec). Per termijn zijn de uitvoeringskosten berekend voor 9 verschillende situaties (A-a,a; B-a,a; etc.) volgens de continue en geheeltallige benadering, beide met en zonder aanvoerkosten van het machinepark. Voor de 9 situaties per termijn zijn indexcijfers gegeven voor de uitvoeringskosten onder diverse omstandigheden op basis van situatie A-a,a = prestatie 100%. De procentuele

[3] Het programma werd door Jac. M. Anthonisse van het Mathematisch Centrum te Amsterdam aangepast aan de omvang van het probleem.

FIG. 12. Uitvoeringskosten van het werk voor 9 situaties bij verschillende termijnen (continue en geheeltallige benadering, met en zonder aanvoerkosten).
n.b. = niet berekend, (117) = indexcijfer op basis (A-a, a) = 100%.

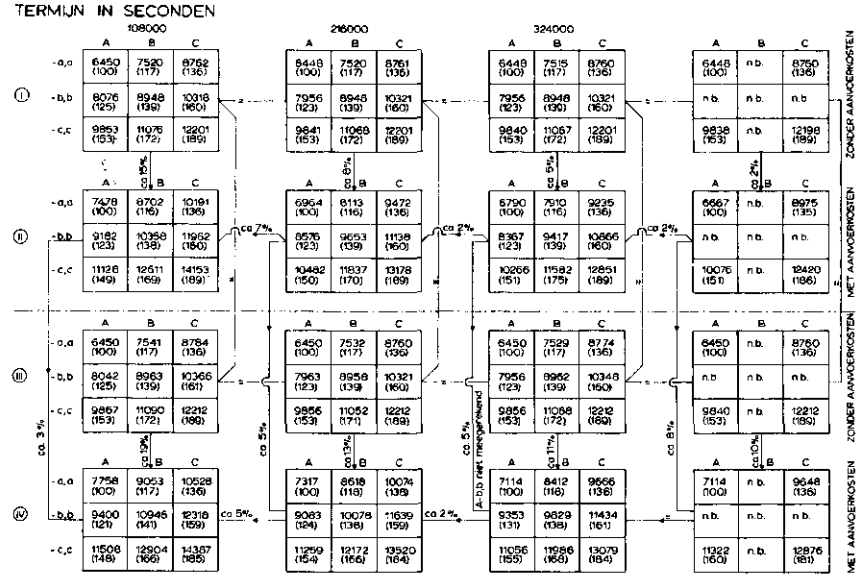


FIG. 12. *Cost of completing a job for 9 situations and varying allowed job time (according continous and discrete methods, with and without cost of machine transport).*
n.b. = not calculated, (117) = index figure on base (A-a, a) = 100%.

toe- of afname van de kosten ten gevolge van een verkorting of verlenging van de termijn zijn bij de lijnen aangegeven, die de groepen van 9 situaties per termijn verbinden. De percentages zijn berekend door per groep van 9 situaties het gemiddelde te nemen van de procentuele stijgingen of dalingen van de kosten t.o.v. overeenkomstige situaties in een andere groep.

Het blijkt dat de kosten, exclusief de aanvoerkosten, voor de uitvoering van het project voor de continue en geheeltallige benadering, gegeven de omstandigheden, nagenoeg gelijk zijn. Afhankelijk van de termijn liggen de kosten voor de uitvoering inclusief de aanvoerkosten, voor de geheeltallige benadering ca. 3–8% hoger dan de continue waarden. De uitvoeringskosten (inclusief aanvoerkosten) voor de continue benadering liggen voor een termijn van 324 000 sec ca. 5% en voor een termijn van 108 000 sec ca. 15% hoger dan de kosten exclusief de aanvoerkosten.

Voor de geheeltallige benadering zijn de waarden voor de genoemde termijnen 11 en 19%.

De uitvoeringskosten nemen toe indien de termijn wordt verkort. Zo is b.v. voor de geheeltallige benadering de stijging 0, 2 en 5% respectievelijk bij een vermindering van de termijn van ∞ tot 324 000 sec, 324 000 sec tot 216 000 sec en 216 000 sec tot 108 000 sec.

De geringe procentuele stijging van de kosten door een verkorting van de termijn kan worden verklaard door de keuze van de prestatiebepalende faktoren en de kosten per tijdseenheid van het in beschouwing genomen werktuigenpark. De gekozen grootheden sluiten aan bij de huidige, in de praktijk geldende, waarden. Bovendien zijn door het optimaliseringsproces alle weinig gebruikelijke en/of economisch niet verantwoorde werkmethoden geëlimineerd. Als voorbeeld kan worden genoemd het overslaan van grond over een grote afstand met een graafmachine. De kostenstijging t.g.v. een wijziging van de omstandigheden, waarbij een verandering in prestatiebepalende faktoren optreedt, volgt onafhankelijk van de termijn en benadering (continu of geheeltallig) nagenoeg een constant patroon. Zo veroorzaakt een wijziging van een situatie A-a,a in C-c,c (prestatiebepalende faktoren met 30% gereduceerd) een kostenstijging van 80–90%.

De consequenties van het niet aanpassen van het werktuigenpark aan gewijzigde omstandigheden en/of het verkorten van de gestelde termijn wordt aan de hand van een voorbeeld in fig. 13 gegeven. Als voorbeeld wordt het machinepark gekozen, dat in een termijn van 324000 sec in de situatie B-b,b het werk kan uitvoeren (eerste gevonden geheeltallige oplossing). De kosten voor de uitvoering van het werk bij een termijn van 324000 sec in de situatie B-b,b blijken

FIG. 13. Uitvoeringskosten van het werk, inclusief aanvoerkosten, voor een drietal termijnen en 9 situaties indien een gekozen machinepark voor een termijn van 324000 sec voor de situatie B-b, b wordt ingezet voor andere situaties en/of bij een gewijzigde termijn.

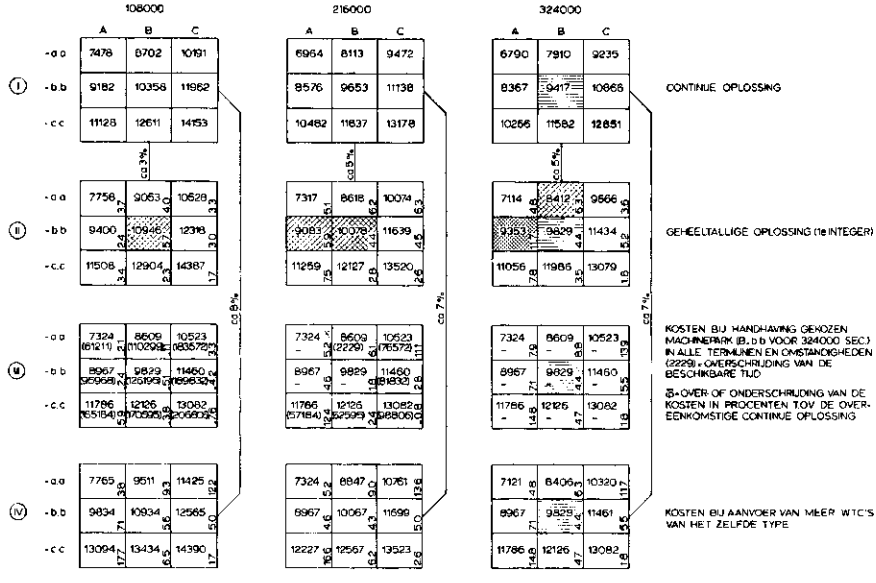


FIG. 13. *Cost of completing a job, including cost of machine transport for three allowed job times and 9 situations, when the machines chosen for a job time of 324000 seconds in situation B-b, b are used in different situations and/or different job times.*

f 9829.– te zijn (fig. 13; rij II, vak 9829). Ter vergelijking zijn in de tabel de uitvoeringskosten opgenomen, die met de continue benadering zijn berekend (rij I). De invloed van een wijziging van de omstandigheden en een verandering van de termijn, gegeven de werktuigcombinaties die voor situatie (B-b,b) en een termijn van 324000 sec zijn ingezet, wordt weergegeven in rij III. Bij een termijn van 324000 sec leidt een verandering van de omstandigheden in het algemeen tot hogere kosten dan bij de geheeltallige oplossing zijn gevonden (rij II). De termijn wordt niet overschreden omdat de WtC's het werk voor omstandigheden (B-b,b) ruim binnen de 324000 sec kunnen uitvoeren (fig. 14). Door een verkorting van de gestelde termijn van 324000 sec naar 216000 sec en het handhaven van het machinepark, ingezet voor situatie B-b,b voor een termijn van 324000 sec blijkt naast een incidenteel optredende kostenverhoging t.o.v. de geheeltallige oplossing (rij II), de termijn van 216000 sec te worden overschreden. Bij een nog verdere verkorting van de termijn tot 108000 sec wordt de termijn in alle gevallen overschreden. De kosten liggen meestal lager dan de waarden gevonden bij de continue (I) en geheeltallige benadering (II). Bij de uitvoering van het project kunnen, indien de beschikbare tijd wordt overschreden, de geringere kosten tegenover het boetebeding worden gesteld. Door aanpassing van het aantal in te zetten WtC's (rij IV) bij een verandering van de termijn kunnen de uitvoeringskosten voor een geheeltallige oplossing worden berekend. In dit geval liggen de kosten voor de beschikbare tijden van 108000, 216000 en 324000 sec gemiddeld respectievelijk ca. 8, 7 en 7% hoger dan de continue oplossing (rij I). Deze percentages liggen iets hoger dan de waarden gevonden bij de vergelijking van de continue oplossing (rij I) met de geheeltallige oplossing (eerste oplossing) (rij II). De variatie binnen de groepen in rij IV is door wijziging van de omstandigheden groter dan in de groepen van rij II. Opgemerkt wordt, dat de eerste geheeltallige oplossingen (rij II) zoals die door de computer zijn berekend in een aantal gevallen kunnen worden verbeterd. Dit wordt veroorzaakt door het afbreken van de berekeningen. In fig. 13 zijn in rij II de oplossingen, die door de uitkomsten van de berekeningen voor de rijen III en IV kunnen worden verbeterd, gearceerd.

Een grafiek van de uitvoeringskosten – inclusief de aanvoerkosten – toont fig. 14. De getrokken lijnstukken geven het traject aan waarin de gevonden oplossing (geheeltallig) waarschijnlijk de beste is. In dit traject zijn de WtC's binnen de gestelde termijn gereed.

In fig. 15 zijn de uitvoeringskosten van het project (geheeltallige benadering) voor drie termijnen en 9 situaties in opklimmende volgorde naar kostenniveau gerangschikt. Hierbij is een indeling aangebracht van de kosten voor de afzonderlijke WtC's; tevens is het aandeel van de WtC's in het totale grondverzet aangegeven. Hieruit blijkt, dat door verandering in de termijn en de omstandigheden de WtC's en hun aandeel in het grondverzet wijzigen.

De verandering in WtC's en het aantal in te zetten WtC's door een wijziging van de termijn is voor een tweetal situaties in fig. 16 gegeven. Voor situaties A-a,a verandert, door wijziging van de termijn, practisch alleen het aantal in te zetten WtC's. De rangschikking van de WtC's over de onderdelen van het werk verandert alleen bij werkonderdeel 4 nl.:

FIG. 14. Uitvoeringskosten van het werk voor 3 termijnen en 9 situaties (continue en geheeltallige benadering).

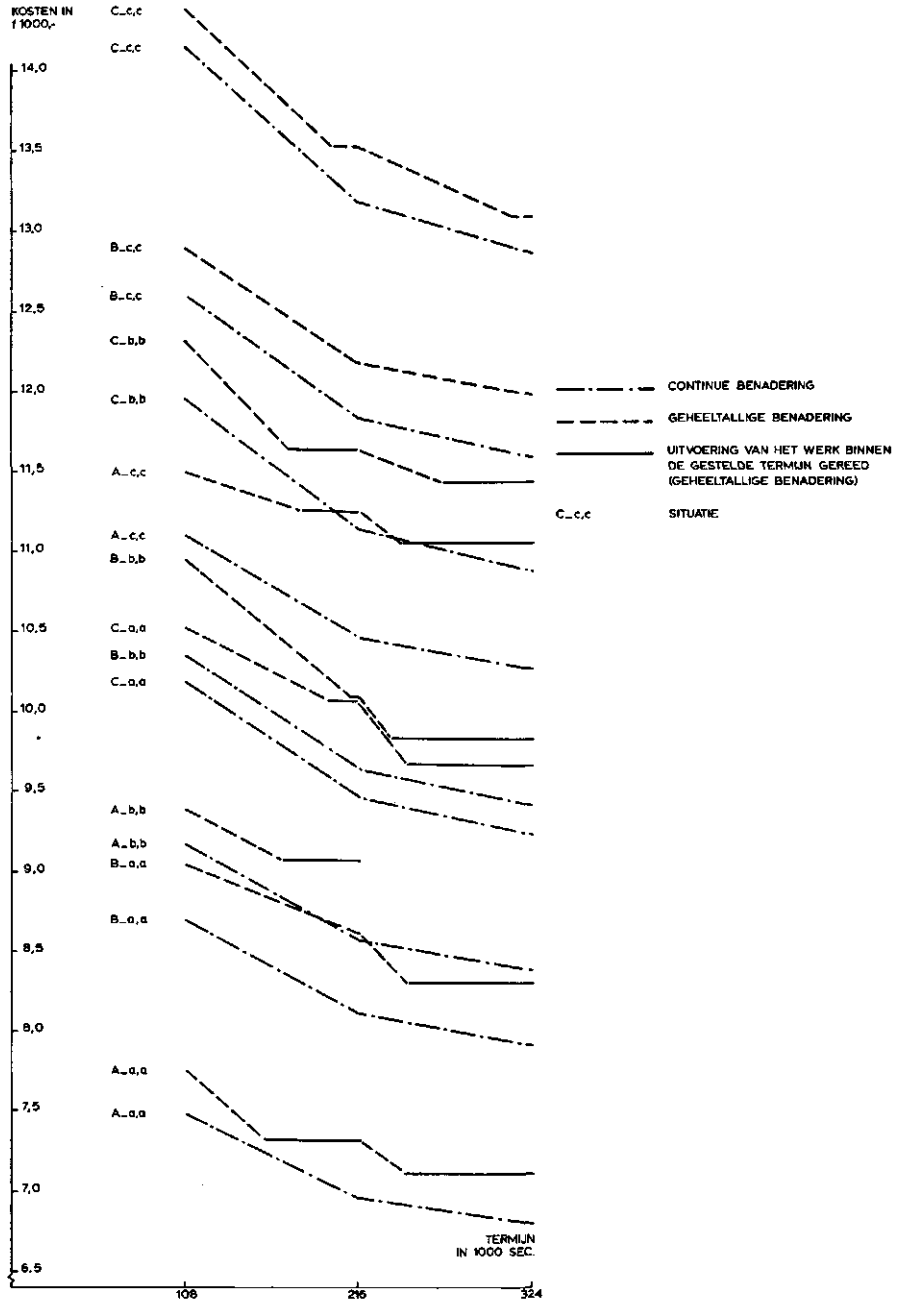


FIG. 14. *Cost of completing a job for three allowed job times and 9 situations (according continuous and discrete method).*

FIG. 15. Aandeel van de werktuigcombinaties (WtC's) in de kosten en in het grondverzet voor 3 termijnen en 9 situaties (geheeltallige benadering)
I = 108000 sec, II = 216000 sec, III = 324000 sec.

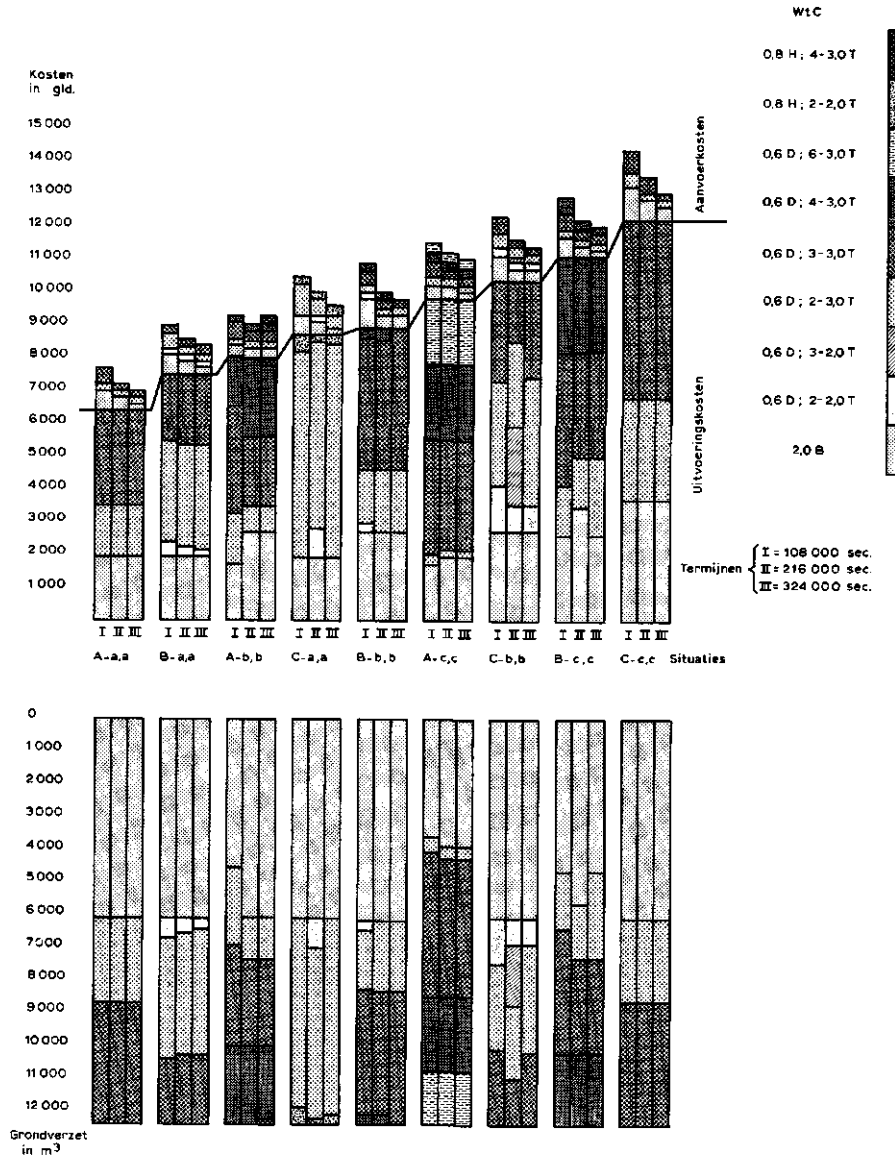


FIG. 15. *Proportion of combinations of machines (WtC's) in cost and earthmoving for 3 allowed job times and 9 situations (according discrete method).*
I = 108000 sec, II = 216000 sec, III = 324000 sec.

FIG. 16. Verandering van WtC's, aantal WtC's en rangschikking over de werkonderdelen van de WtC's door wijziging van een gestelde termijn (geheeltallige benadering).

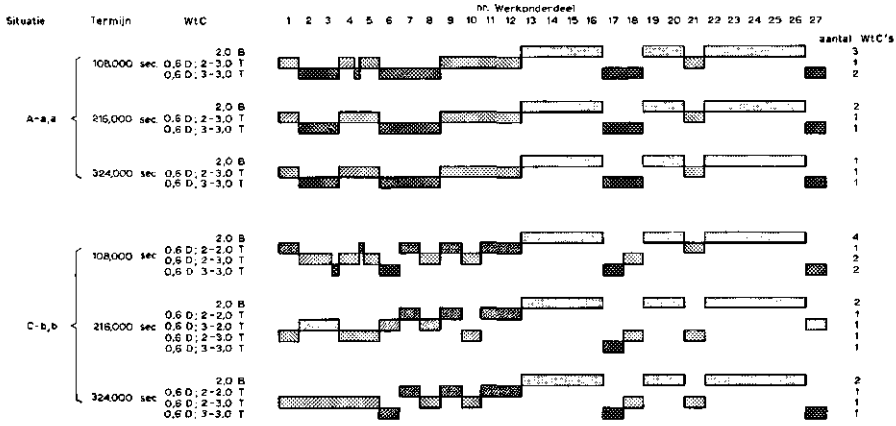


FIG. 16. *Change of WtC's, number of WtC's and arrangement of WtC's over elements due to change in job time (according discrete method).*

bij 108000 sec uitvoering door 0,6D; 2–3,0T en 0,6D; 3–3,0T.
bij 216000 sec en 324000 sec uitvoering alleen door 0,6D; 2–3,0T.

Voor situatie C-c,b veranderen, door een wijziging van de termijn, zowel de WtC's als het aantal in te zetten WtC's. De invloed van een verandering van de omstandigheden op de in te zetten WtC's en het aantal WtC's is voor een termijn van 108000 sec in fig. 17 gegeven. Hieruit blijkt, dat een aantal werkonderdelen altijd door een bepaalde WtC wordt uitgevoerd; b.v. de werkonderdelen 14, 15, 16, 20, 23, 24 en 26 door een bulldozertype 2. Het aantal aangevoerde machines wisselt echter. Daarentegen worden, afhankelijk van de omstandigheden en de termijn in b.v. de werkonderdelen 2, 3 en 6 verschillende WtC's ingezet.

Opgemerkt wordt, dat bij een verandering van de WtC's hoofdzakelijk het aantal transportmiddelen wordt gewijzigd. Wijziging van type graafmachine en transportmiddel komen minder voor.

4.5.2. *Hydraulisch grondverzet*

Voor het hydraulisch grondverzet zijn twee programma's gebruikt. Eén programma, dat het tracé van de persleiding bepaalt en één programma, dat de uitvoeringstijd en -kosten berekent (MIJNLIEFF en BUSSER 1973). Gesteld kan worden dat bij het hydraulisch grondverzet naar iedere plaats waar zand nodig is, een persleiding moet worden gelegd. Het alternatief om plaatselijk een depôt te spuiten en de specie naderhand met een andere werkmethode te transporteren is afhankelijk van de kosten voor het hydraulisch grondtransport ten opzichte van de transportkosten met een andere machine. Vooral bij kleine hoeveelheden

FIG. 17. Veranderingen van WtC's, aantal WtC's en rangschikking over werkonderdelen van WtC's door wijziging van de situatie voor een gestelde termijn van 108000 sec (geheeltallige benadering).

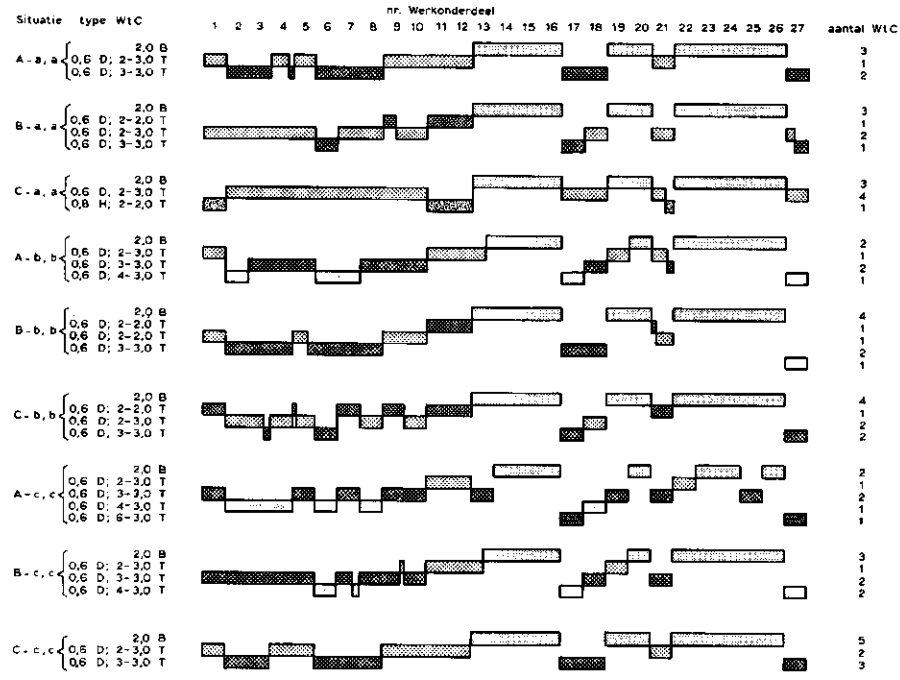


FIG. 17. *Change of WtC's, number of WtC's and arrangement of WtC's over elements resultive from a change in the situation for a job time of 108000 sec (discrete method).*

per m^1 zal in depôt spuiten aantrekkelijk zijn i.v.m. kosten van de aanleg en het verplaatsen van de persleiding. In het kader van dit onderzoek wordt dit alternatief, gezien de vele mogelijkheden, niet in beschouwing genomen.

Voor de uitvoering van het plan met het hydraulisch grondverzet is voor iedere afstandsklasse (tabel 8), rekening houdend met de mogelijke concentratie, de tijdsduur berekend voor het aanvoeren van de benodigde m^3. In de tabellen 16, 17 en 18 zijn voor de verschillende machines de tijden vermeld. Uit de tabellen blijkt dat met de zuigers type 1 en type 2 het transport van de grond niet met alle concentraties over de verschillende afstandsklassen kan worden uitgevoerd. Dit wordt veroorzaakt door het onderschrijden van de kritische snelheid bij deze concentraties en transportafstanden. Onderschrijding van de kritische snelheid veroorzaakt het zogenoemde verzanden van de persleiding.

Voor de hoogst mogelijke concentratie zijn in tabel 19 de uitvoeringstijden en prestaties in m^3/uur voor het grondtransport gegeven voor zuigertype 1 al of niet gecombineerd met een tussenstation en voor zuigertype 2. Bij zuigertype 1

TABEL 16. Tijdsduur (seconden) voor het aanvoeren van de benodigde hoeveelheden grond (m^3) met zuigertype 1 bij verschillende transportconcentraties.

Gemiddelde afstand	Hoeveelheid	Transportconcentratie (k_t)						
m	m^3	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21
700	494	30411	15408	10407	7906	6404	5399	4678
800	3005	197472	100567	68318	52232	42609	36213	31657
900	2080	144964	74258	50793	39152	32259	27758	–
1000	1648	121248	62520	43121	33601	–	–	–
1100	1130	87314	45357	31600	–	–	–	–
1200	772	62524	32759	–	–	–	–	–
1300	1285	108907	57625	–	–	–	–	–
1400	243	21417	11461	–	–	–	–	–
	10657							

Mean distance	*Quantity*	*Transport concentration* (k_t)
m	m^3	

TABLE 16. *Time (in seconds) required for supplying the necessary quantity of earth (m^3) with dredge type 1 and various transport concentrations.*

TABEL 17. Tijdsduur (seconden) voor het aanvoeren van de benodigde hoeveelheid grond (m^3) met zuigertype 1 gecombineerd met een tussenstation bij diverse concentraties.

Gemiddelde afstand	Hoeveelheid	Transportconcentratie (k_t)						
m	m^3	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21
700	494	21613	10785	7173	5439	4409	3722	3233
800	3005	139505	69709	46418	34754	27906	23574	20487
900	2080	101828	50958	33982	25478	20362	16943	14734
1000	1648	84695	42453	28356	21293	17042	14197	12154
1100	1130	60607	30431	20083	15316	12279	10245	8784
1200	772	43190	21728	14566	10977	8818	7372	6332
1300	1285	74796	37704	25329	19131	15402	12903	11108
1400	243	14621	7387	4973	3765	3039	2552	2203
	10657							

Mean distance	*Quantity*	*Transport concentration* (k_t)
m	m^3	

TABLE 17. *Time (in seconds) required for supplying the necessary quantity of earth (m^3) with dredge type 1 combined with booster and various transport concentrations.*

gecombineerd met een tussenstation, is het tussenstation zodanig geplaatst dat alle grond met deze combinatie naar de verschillende plaatsen kan worden getransporteerd. De prestatie in m^3/uur wordt kleiner bij een toenemende afstand. Dit wordt veroorzaakt door een afname van het debiet bij toenemende lengte

TABEL 18. Tijdsduur (seconden) voor het aanvoeren van de benodigde hoeveelheid grond (m^3) met zuigertype 2 bij diverse concentraties.

Gemiddelde afstand	Hoeveelheid	Transportconcentratie (k_t)						
m	m^3	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21
700	494	26026	13068	8744	6578	5274	4401	3773
800	3005	168757	84987	57036	43034	34608	28965	24905
900	2080	123683	62490	42082	31865	25720	21607	18651
1000	1648	103266	52360	35398	26917	21825	18423	15983
1100	1130	74150	37745	25630	19586	15969	13564	11850
1200	772	53022	27109	18501	14224	11681	10011	8842
1300	1285	92132	47331	32492	25166	–	–	–
1400	243	18069	9331	6449	5041	–	–	–
	10657							
Mean distance m	*Quantity m^3*	*Transport concentration* (k_t)						

TABLE 18. *Time (in seconds) required for supplying the necessary quantity of earth (m^3) with dredge type 2 and various transport concentrations.*

TABEL 19. Tijd nodig voor de aanvoer van de grond met de verschillende machines (hoogst mogelijke concentratie).

Gemiddelde afstand m	Hoeveelheid m^3	Zuiger 1			Zuiger 1 + tussenstation			Zuiger 2		
		conc.	tijd sec.	m^3/uur	conc.	tijd sec.	m^3/uur	conc.	tijd sec.	m^3/uur
700	494	0,21	4678	380	0,21	3233	550	0,21	3773	471
800	3005	0,21	31657	342	0,21	20487	528	0,21	24905	434
900	2080	0,18	27758	270	0,21	14734	508	0,21	18651	401
1000	1648	0,12	33601	176	0,21	12154	488	0,21	15983	371
1100	1130	0,09	31600	129	0,21	8784	463	0,21	11850	343
1200	772	0,06	32759	85	0,21	6332	439	0,21	8842	314
1300	1285	0,06	57625	80	0,21	11108	416	0,12	25166	184
1400	243	0,06	11461	76	0,21	2203	397	0,12	5041	173
Totaal *Total*	10657		231136			79035			114211	
Gemiddeld *Mean*				166			485			240
Average distance m	*Quantity m^3*	*con.*	*time sec*	*m^3/h*	*con.*	*time sec*	*m^3/h*	*con.*	*time sec.*	*m^3/h*
		Dredge 1			*Dredge 1 + booster*			*Dredge 2*		

TABLE 19. *Time required for supplying earth with different dredges (highest possible concentration).*

van de persleiding (hogere weerstand). Uit verschillende benodigde tijden voor het grondtransport met de verschillende machines blijkt, dat bij een gestelde termijn van 324000 sec alle machines in aanmerking kunnen komen om het werk uit te voeren. Bij een termijn van 216000 sec valt zuigertype 1 af. Indien de termijn op 108000 sec wordt gesteld kan alleen de combinatie van zuigertype 1 en een tussenstation de grond binnen de gestelde termijn aanvoeren.

Een aantal van de genoemde tijden zouden in de praktijk alleen kunnen worden gerealiseerd indien de grond zonder aan- of afkoppelen van de persleiding in het stort kan worden gebracht. Het stort bestaat in dit geval echter uit een slootgedeelte van 100 m. In relatie tot de inhoud van de te dempen sloten in het gebied (4 m^3/m^1) zijn de prestaties van de zuigers bij de hoogst mogelijke concentratie in het algemeen zo hoog, dat de beschikbare tijd om de buizen tijdens het spuiten van de persleiding aan- of af te koppelen te gering is. Zo is b.v. voor zuigertype 2 de tijd om een hoeveelheid grond aan te voeren voor het dempen van een sloot van 4 m^3/m^1 op 700 m afstand (prestatie 471 m^3/uur, zie tabel 19):

$$\frac{4}{471} 3600 = \text{ca. } 31 \text{ sec/m}^1 \text{ sloot}$$

Indien buizen ter lengte van 5 m worden gebruikt bedraagt de tijd voor het dempen van de corresponderende slootlengte ca. 153 sec. Voor zuigertype 1 is de tijd voor dezelfde situatie (prestatie 380 m^3/uur, zie tabel 19):

$$\frac{5 \cdot 4}{380} 3600 = \text{ca. } 190 \text{ sec/5 m}^1 \text{ sloot}$$

Wanneer voor een bepaald zuigertype voor het storten van grond en het wijzigen van de persleiding tenminste 5 minuten beschikbaar moeten zijn, moet óf het stort een zodanige omvang hebben, dat het in deze tijd bij de gunstigste concentratie zonder wijziging van de persleiding kan worden volgestort, óf de concentratie van het mengsel worden verminderd óf het debiet worden verlaagd door in de persleiding extra weerstanden aan te brengen. Het debiet aan vaste stof dat in 5 minuten nog kan worden verwerkt bij het dempen van een sloot van 4 m^3/m bedraagt (buislengte = 5 m):

$$\frac{5 \cdot 4}{300} 3600 = 240 \text{ m}^3\text{/uur}$$

Uit de tabellen 16, 17 en 18 zijn de tijden en de concentraties af te leiden waarbij de verschillende machines deze prestatie bereiken. De benodigde tijd in seconden voor het grondtransport over een bepaalde afstand, zoals deze in de genoemde tabellen is aangegeven, moet hierbij groter zijn dan:

$$\frac{\text{aan te voeren hoeveelheid grond per afstand}}{\text{maximaal toelaatbare prestatie}} 3600$$

TABEL 20. Tijd nodig voor de aanvoer van de grond met de verschillende machines, indien een concentratie wordt gekozen, waarbij het debiet aan vaste stof niet groter mag zijn dan 240 m^3/uur.

Gemiddelde afstand m	Hoeveelheid m^3	Zuiger 1			Zuiger 1 + tussenstation			Zuiger 2		
		conc.	tijd sec	m^3/uur	conc.	tijd sec	m^3/uur	conc.	tijd sec	m^3/uur
700	494	0,12	7906	225	0,09	7173	248	0,09	8744	203
800	3005	0,12	52232	207	0,09	46418	233	0,09	57036	190
900	2080	0,15	32259	232	0,09	33982	220	0,12	31865	235
1000	1648	0,12	33601	176	0,09	28356	209	0,12	26917	220
1100	1130	0,09	31600	129	0,09	20083	203	0,12	19586	208
1200	772	0,06	32759	85	0,09	14566	191	0,15	11681	238
1300	1285	0,06	57625	80	0,12	19131	242	0,12	25166	184
1400	243	0,06	11461	76	0,12	3765	232	0,12	5041	173
Totaal *Total*	10657		259443			173474			186036	
Gemiddeld *Mean*				148			221			206
Mean distance m	*Quantity* m^3	*con.*	*time sec*	m^3/h	*con.*	*time sec*	m^3/h	*con.*	*time sec*	m^3/h
		Dredge 1			*Dredge 1 + booster*			*Dredge 2*		

TABLE 20. *Time required for supplying earth with different dredges, if a rate of concentration is chosen at which no more than 240 m^3 of solids per hour is transported.*

In tabel 20 zijn per afstand de concentraties, tijden en prestaties per uur en de totale uitvoeringstijden opgenomen, indien minstens 5 minuten voor het aan- of afkoppelen van een buis aan het einde van de persleiding op het stort beschikbaar moet zijn. Tabel 21 bevat de gegevens indien hiervoor minstens 10 minuten per buis op het stort beschikbaar moet zijn. De prestatie per uur mag dan niet groter zijn dan 120 m^3/uur. Uit tabel 20 blijkt dat voor een maximale prestatie van 240 m^3/uur en een termijn van 324000 sec alle machines in aanmerking kunnen komen om het werk uit te voeren. Bij een termijn van 216000 sec valt zuigertype 1 af. Indien de termijn op 108000 sec wordt gesteld kan, gegeven de machinekeuze, hydraulisch grondverzet niet worden toegepast. Indien de maximale prestatie op 120 m^3/uur wordt gesteld (tabel 21), liggen alle benodigde tijden voor het grondtransport voor het gehele werk boven de 324000 sec. In de berekende tijden voor de aanvoer van de grond zijn niet inbegrepen de tijden voor het voor- en nawerk, aan- en aflooptijden, calamiteiten en de tijd nodig om de persleiding met water door te spoelen indien van stort moet worden gewisseld.

Geconcludeerd kan worden, dat bij een maximale prestatie van 120 m^3/uur hydraulisch grondverzet bij de gestelde termijnen niet als uitvoeringsmethode

TABEL 21. Tijd nodig voor de aanvoer van de grond met de verschillende machines, indien een concentratie wordt gekozen waarbij het debiet aan vaste stof niet groter mag zijn dan 120 m³/uur.

Gemiddelde afstand m	Hoeveelheid m³	Zuiger 1			Zuiger 1 + tussenstation			Zuiger 2		
		conc.	tijd sec	m³/uur	conc.	tijd sec	m³/uur	conc.	tijd sec	m³/uur
700	494	0,06	15408	115	0,03	21613	82	0,06	13068	136
800	3005	0,06	100567	108	0,03	139505	77	0,06	84987	127
900	2080	0,06	74258	101	0,03	101828	73	0,06	62490	120
1000	1648	0,06	62520	95	0,06	42453	140	0,06	52360	113
1100	1130	0,06	45357	90	0,06	30431	134	0,06	37745	108
1200	772	0,06	32759	85	0,06	21728	128	0,06	27109	103
1300	1285	0,06	57625	80	0,06	37704	123	0,06	47331	98
1400	243	0,06	11461	76	0,06	7387	118	0,06	9331	94
Totaal *Total*	10657		399955			402649			334421	
Gemiddeld *Mean*				96			95			115
Mean distance m	*Quantity m³*	*con.*	*time sec*	*m³/h*	*con.*	*time sec*	*m³/h*	*con.*	*time sec*	*m³/h*
		Dredge 1			*Dredge 1 + booster*			*Dredge 2*		

TABLE 21. *Time required for supplying earth with different dredges, if a rate of concentration is chosen at which no more than 120 m³ of solids per hour is transported.*

voor het werk in aanmerking komt. Voor een maximale prestatie van 240 m³/uur kan voor de termijnen 216000 sec en 324000 sec dit type grondverzet wel worden ingezet. Voor de berekening van de uitvoeringskosten voor deze termijnen zijn de in de tabel 22 vermelde huurprijzen van het materieel en de arbeidskosten aangehouden. De kosten per week voor de uitvoering van het werk (zonder aanvoerkosten) met de verschillende machines bedragen:

zuigertype 1 f 7731
zuigertype 2 f 9042
zuigertype 1 + tussenstation f 9828

De kosten voor de aanvoer van de grond bij een maximale prestatie van 240 m³/uur en een gestelde 40-urige werkweek zijn (exclusief aanvoerkosten materieel):

zuigertype 1 $$259443 \cdot \frac{7731}{40 \cdot 3600} = \text{ca. f } 13929$$

$$\text{zuigertype 1} + \text{tussenstation } 173474 \cdot \frac{9828}{40 \cdot 3600} = \text{ca. f } 11840$$

$$\text{zuigertype 2} \qquad 186036 \cdot \frac{9042}{40 \cdot 3600} = \text{ca. f } 11682$$

TABEL 22. Huurkosten (gulden) materieel en arbeidskosten per week (NIVAG 1967).

Bodemzuiger type 1		2567,—
Dredger type 1		
Bodemzuiger type 2		3878,—
Dredger type 2		
Tussenstation		2097,—
Booster station		
Persleiding ⌀ 30 cm; 2000 m à 0,47	=	940,—
Discharge pipe		
Drijvende leiding ⌀ 30 cm; 100 m à 0,70	=	70,—
Floating pipe		
Drijvers 20 st. à 1,76	=	35,20
Floats		
Bochten 10 st. à 2,66	=	26,60
Bends		
Afsluiters 2 st. à 13,32	=	26,64
Valves		
Wissels 2 st. à 32,63	=	65,26
Switches		
		1163,70
Trekker en wagen	800,—	
Tractor and dumper		
Personeel	3200,—	
Labour		

TABLE 22. *Cost (Hfl) of hiring machinery and labour per week.*

Deze kosten moeten worden verhoogd met de kosten voor het egaliseren van de percelen 6 en 7 en het graven van twee nieuwe sloten (groepen 5 en 9) om een vergelijking met het droge grondverzet mogelijk te maken. De uitvoeringskosten exclusief aanvoerkosten hiervan, zoals die uit de uitkomsten van de berekeningen voor het droge grondverzet kunnen worden afgeleid voor de situatie B-b,b, zijn ca. f 1775.

De totale kosten voor de uitvoering van het werk met het hydraulisch grondverzet, verhoogd met de kosten voor het graven van de sloten en het egaliseren van de percelen, zijn voor de twee termijnen in tabel 23 gegeven. De aanvoerkosten van het benodigde materieel zijn niet in de berekeningen opgenomen, omdat de gekozen machines voor hydraulisch grondverzet in het algemeen voor grotere projecten dan het onderhavige zullen worden ingezet. Voor een verge-

lijking van de kosten voor hydraulisch grondverzet met droog grondverzet (fig. 12) dienen bij de laatste de aanvoerkosten eveneens buiten beschouwing te worden gelaten. De kosten van het hydraulisch grondverzet liggen in dezelfde orde van grootte als de kosten voor de uitvoering van het werk met het droge grondverzet onder ongunstige omstandigheden.

TABEL 23. Uitvoeringskosten (gulden) van het hydraulisch grondverzet verhoogd met de kosten voor het graven van twee sloten en het egaliseren van twee percelen (exclusief aanvoerkosten van het materieel).

Machine	Termijn	
	216000 sec	324000 sec
Zuiger 1	–	15704
Dredge type 1		
Zuiger 1 + tussenstation	13615	13615
Dredge type 1 + booster		
Zuiger 2	13457	13457
Dredge type 2		
	Job time	

TABLE 23. *Cost (Hfl) of completing a job with hydraulic earthmoving including cost of excavating two ditches and levelling two sections (not including cost for transport of equipment).*

5. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

1. Bij cultuurtechnische werken vormt het grondverzet een belangrijk aandeel zowel in het te verrichten werk als in de kosten. De werken omvatten o.a. aanleg of verbetering van wegen en waterlopen en de inrichting of herinrichting van een gebied binnen een gegeven stramien van wegen en waterlopen.

Voor de realisering van de plannen voor deze werken wordt voor het grondverzet een keuze gemaakt uit een aantal typen machines die in principe in aanmerking komen om het werk uit te voeren. Bij de kostenberekening speelt de keuze van het in te zetten machinepark een rol.

In het onderhavige onderzoek worden voor een werk dat kan worden uitgevoerd met bulldozers, draglines en dumpers (droge grondverzet) de minimale kosten bepaald. Hierbij wordt uitgegaan van een termijn waarbinnen het werk gereed dient te zijn. Daarnaast wordt nagegaan hoe de minimale kosten en het hierbij behorende machinepark worden beïnvloed door een verandering van de gestelde termijn en door de omstandigheden die tijdens de uitvoering van het werk worden verwacht. Ter oriëntatie worden ook de uitvoeringskosten van het werk met het hydraulisch grondverzet berekend. Gezien de grootte van het gekozen werk is gesteld dat het werk slechts door één machine kan worden uitgevoerd. De binding aan een termijn is hierdoor vervallen. De kostenberekeningen zijn uitgevoerd voor een tweetal plannen waarbij de hoeveelheden te ontgraven en te storten grond en de plaatsen waar dit moet gebeuren dwingend zijn voorgeschreven (+ en — kaart).

Het eerste grondverzetsplan is toegespitst op het 'droge grondverzet' i.e. met graafmachines, transportmiddelen en bulldozers; het tweede plan op het hydraulische grondverzet, waarbij alleen de noodzakelijke egalisaties door bulldozers of draglines en de te graven sloten door graafmachines worden uitgevoerd. De perceelsindeling van beide plannen is gelijk, de uiteindelijke maaiveldsligging en slootinhouden wijken van elkaar af. De bestaande en nieuwe situatie zijn in de figuren 11 en 12 weergegeven.

2. De laagste kosten voor de uitvoering van een werk kunnen worden verkregen door het minimaliseren van formule 2 genoemd in hfst. 2. Bij de berekening van de uitvoeringskosten voor een werk zijn twee benaderingen gevolgd teweten een continue en een geheeltallige. Bij de eerste benadering wordt aangenomen dat een fractie van een machine een onderdeel van het werk of een gedeelte daarvan kan uitvoeren. Bij de tweede benadering kan alleen een geheel aantal machines worden ingezet.

3. Voor het ontwerpen en berekenen van een grondverzetsplan zijn verschillende ontwerp- en rekentechnieken ontwikkeld die min of meer de hoeveelheid te verzetten grond minimaliseren. De resultaten van een grondverzetberekening geven de hoeveelheid te ontgraven en te storten grond en de plaatsen waar dit

moet gebeuren (grondbalans). Op basis van deze gegevens kunnen de transportplannen (droog grondverzet fig. 8 en 9: hydraulisch grondverzet fig. 11) worden opgesteld. De noodzakelijke berekeningen voor het opstellen van een transportplan zijn met een computer uitgevoerd. Bij de berekening van het transportplan voor het droge grondverzet is het, bij de gekozen werkwijze, niet mogelijk gebleken het probleem, gezien de omvang van het cijfermateriaal in één keer door de beschikbare computer te laten verwerken. Het transportplan is verkregen door het gehele gebied te verdelen in een aantal deelgebieden, waarin het aantal punten de capaciteit van de computer niet overschreed. De indeling in deelgebieden berustte op een transportplan voor een sterk gereduceerd aantal ophogings- en afgravingspunten. Het gereduceerde aantal punten werd verkregen door voor beide genoemde categorieën voor een aantal punten de hoeveelheid per punt te sommeren en het totaal te situeren in het zwaartepunt van de punten.

4. Voor de berekening van de kosten voor de uitvoering van het grondverzet met verschillende machines zijn een aantal computerprogramma's ontwikkeld waarin de prestatiebepalende faktoren van de machines zijn verdisconteerd. Door deze werkwijze kunnen de uitvoeringsomstandigheden in het rekenproces worden opgenomen indien zowel de kwalitatieve als kwantitatieve gegevens hierover en hun invloed op de prestatiebepalende faktoren bekend zijn. De programma's voor de graafmachines al of niet gecombineerd met transportmiddelen zijn gebaseerd op de formules 5 en 11 t/m 18; voor de bulldozers op formule 22. Voor het hydraulisch grondverzet werd een programma opgesteld waarin o.a. de gegevens van pomp, motor en grondsoort zijn verwerkt. De berekening van de uitvoeringstijd en -kosten op basis van formule 23 is in het programma opgenomen.

5. Voor het droge grondverzet zijn de transportlijnen (fig. 8 en 9) met de bijbehorende hoeveelheden in een aantal groepen ingedeeld (fig. 10). Per groep werden de kosten van uitvoering voor alle in te zetten werktuigen of werktuigcombinaties berekend. De resultaten van de berekeningen werden in een matrix gerangschikt (tabel 15). In deze matrix zijn de uitvoeringstijd en -kosten per machine of machinecombinatie voor iedere groep opgenomen. Door toepassing van een lineaire programmering werden, gegeven een bepaalde termijn, de minimale uitvoeringskosten voor het werk berekend en het bijbehorende machinepark bepaald. De berekeningen werden zowel voor een continue als een geheeltallige benadering uitgevoerd. Voor de uitvoering van het project onder andere omstandigheden werden de produktiebepalende faktoren van de machines met 15 en 30% gereduceerd (tabel 12 en 13). Voor het hydraulisch grondverzet werden de transportafstanden ingedeeld in afstandsklassen. Per afstandsklasse werd de aan te voeren hoeveelheid grond aangegeven (tabel 8). Voor iedere afstandsklasse werd de tijd berekend die nodig is om de grond over deze afstand te transporteren. De totale uitvoeringstijd werd verkregen door sommatie van de uitvoeringstijden per afstandsklasse. Door vermenigvuldiging van de totale uit-

voeringstijd met de kosten per tijdseenheid werden de uitvoeringskosten berekend.

6. De resultaten van de berekeningen voor het droge grondverzet zijn in fig. 12 gegeven. Hieruit is af te leiden dat bij het opstellen van een begroting de te verwachten omstandigheden, indien zij van invloed zijn op de prestatiebepalende faktoren van de machine, moeten worden aangegeven, omdat zij een grote invloed kunnen hebben op de kosten. Zo is bijvoorbeeld ten opzichte van de gunstigste situatie (A-a,a) in het geval van een reductie van de prestatie bepalende faktoren van de machines met 15% (B-b,b) een kostenstijging van ca. 40% opgetreden. De verandering in de kosten wordt veroorzaakt door een wijziging in het aantal en type aan te voeren machines; de toewijzing van de machines aan de verschillende onderdelen van het werk kan hierdoor worden gewijzigd.

De invloed van een wijziging van de termijn op de kostenbegroting blijkt, indien het machinepark in aantal en type wordt aangepast, in het gekozen voorbeeld niet zo groot te zijn als de invloed van een verandering van de omstandigheden. Een wijziging van de termijn leidt ook in dit geval tot een verandering in het aantal en type in te zetten machines en in de toewijzing van de machines aan de verschillende onderdelen van het werk. Indien de omstandigheden tijdens de uitvoering van het werk slechter zijn dan die waarmee bij de begroting rekening is gehouden, kan bij niet aanpassen van het machinepark de gestelde termijn worden overschreden. Een overschrijding van een termijn kan aanleiding geven tot het in werking treden van een boetebeding.

De bepaling van de minimale kosten bij de geheeltallige benadering blijkt in de meeste gevallen zeer tijdrovend te zijn. In dit onderzoek is daarom volstaan met de eerste geheeltallige oplossing, die door de computer is gevonden. In de berekeningen zijn verschillende kostenbepalende faktoren, zoals schadevergoedingen, herstelkosten e.d. niet opgenomen. Deze kosten kunnen echter op de plaatsen waar zij betrekking op hebben in de kosten-uitvoeringstijd matrix worden ingevoerd en op deze manier in het optimaliseringsproces worden meegenomen.

7. Bij het hydraulisch grondverzet worden, gegeven de machines en de grondsoort, de prestaties bepaald door de transportafstand en de mogelijke concentratie van de vaste stof in de transportleiding (tabellen 16, 17 en 18). Een toename van de transportafstand geeft aanleiding tot een daling van de prestatie door een verlaging van het debiet van het mengsel (verhoging van de leidingweerstand). Tevens is het mogelijk dat bij toename van de transportafstand de concentratie van de vaste stof in de vloeistof moet worden verlaagd om te voorkomen dat de kritische snelheid wordt onderschreden. De concentratie van de vaste stof wordt, naast de beperkingen die aan de zuig- en perszijde van de pomp kunnen worden gesteld, mede bepaald door de eis dat het debiet aan vaste stof op het stort moet kunnen worden verwerkt (tijd nodig om de buizen aan- of af te koppelen). De beperkingen aan de zuig- en perszijde van de pomp hebben o.a. betrekking op de maximaal te bereiken concentratie aan de zuigzijde, de

maximaal toelaatbare onderdruk en de kritische snelheid. Het hydraulisch grondverzet kan, rekening houdend met de genoemde beperkingen, niet voor alle gestelde termijnen worden toegepast (tabel 20 en 21).

In tabel 23 zijn de uitvoeringskosten voor het werk met de in aanmerking komende machines gegeven. De kosten van het hydraulisch grondverzet liggen, bij de gekozen uitgangspunten, in dezelfde orde van grootte als de kosten voor de uitvoering van het werk met het droge grondverzet (fig. 12) onder ongunstige omstandigheden (in beide gevallen exclusief aanvoerkosten van het materieel).

6. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Analysis and cost minimization of movement of earth

1. In land development projects earthmoving constitutes a major part of the operations, involving a considerable portion of the total expenditure. Operations generally include the construction or improvement of roads and watercourses and the arrangement and re-arrangement of an area within a specific network of roads and watercourses.

For the realization of earthmoving projects a choice is made from suitable equipment, which is to some extent determined by an estimate of the total cost. In this study the minimum cost is assessed for a job that can be carried out by bulldozers, dragline excavators and dumpers, referred to in Dutch as 'dry' earthmoving to distinguish it from hydraulic work. It is taken that the work must be completed within a certain time. It is ascertained how the minimum cost and the relevant equipment are affected by a change in the job time specified and the conditions expected during the execution of the job. By comparison, the cost of hydraulic earthmoving (by suction dredges) is also calculated. Because of the size of the job it is assumed that it can be carried out by one suction dredge, thus eliminating in this case the commitment to complete it within a particular time. Cost calculations have been made for two schemes prescribing (unalterable) volumes of earth to be excavated and dumped, as well as the dumping location (+ and − chart).

The emphasis of the first earthmoving scheme is on 'dry' earthmoving, i.e. by excavators, haul units and bulldozers; the second scheme is carried out by suction dredges. In the latter scheme only indispensable levelling is done by bulldozers or dragline excavators and ditches are dug by excavators. Sectional division of the two schemes are identical. The ultimate surface elevations and ditch capacities are different. The existing and new situations are shown in Figures 11 and 12.

2. To calculate the cost of a job a continuous and a discrete method are employed. In the former it is assumed that a fraction of a machine can perform an element or a sub-element of the job. In the latter method only a complete set of equipment can be operated with.

3. For the planning and calculating of an earthmoving scheme various design and computation techniques have been devised, which more or less minimize the volume of earth to be moved. The results of an earthmoving computation show the volumes of earth to be excavated and to be dumped as well as their sites (cut and fill balance). Based on these data the transport schemes (dry earthmoving Figures 8, 9; hydraulic earthmoving Figure 11) can be devised. The necessary computations for devising a transport scheme have been made by computer. When computing the transport scheme for dry earthmoving the

procedure selected made it, because of the vast number of data, impossible for the problem to be processed in one operation.

The transport scheme has been obtained by dividing the whole area into sections, in which the number of points did not exceed the capacity of the computer. This division into sections was based upon a transport scheme for a considerably reduced number of cut and fill points. The reduced number of points was obtained by adding the volumes per point for a certain number of points (of cut and fill) and to locate the total in the balance point.

4. To find the cost of earthmoving with various machines a number of computer programmes have been evolved, in which the output-determining factors of the machines have been taken into account. By this procedure the operational conditions can be included in the computation process, if both the qualitative and the quantitative data and their influence on the output determining factors are known.

The programmes for excavators combined or not combined with haul units are based on the formulas 5 and 11–18; for the bulldozers on formula 22. For hydraulic earthmoving a programme was devised, which includes data on pump, engine and soil type. The computation of the period for completing the job and of the cost based on formula 23 have been included.

5. For dry earthmoving the transport lines (Figures 8 and 9) with relevant volumes have been divided into a number of groups (Figure 10). Per group the cost was calculated for all equipment employed. The results of the computations were arranged in a matrix (Table 15). This matrix includes the period of completion and the cost per machine or machinery combination for each group.

By applying linear programming, for a particular period the minimum completion cost of a job was calculated and the relevant equipment was determined. The computations were made for a continuous as well as for a discrete method. For the execution of the project under different conditions the output determining factors of the machines were reduced by 15% and 30% (Tables 12 and 13).

For hydraulic earthmoving the transport distances were divided into distance classes. Per distance class the volume of earth to be dumped was indicated (Table 8). For each distance the time needed to move earth over this distance was computed. The total time of completion was obtained by adding the periods of completion per distance. By multiplying the total time of completion by the cost per time unit the total cost was computed.

6. The results of the computations for dry earthmoving are shown in Figure 12.

These suggest that in making an estimate the conditions expected must be known if they affect the output determining factors of the machine, because they may have a large influence on the total cost. For example: compared with the most favourable situation (A-a,a) there has been found to be an increase in cost of approximately 40% in the case of a reduction of the output determining factors of the machines by 15% (B-b,b). The change in cost results from a change

in the number and types of machines employed; the assignment of machines to the various elements of the job can be changed. When the numbers and types of machines are re-assigned, the influence of a change in allowed job time on the estimate of cost proves to be less important in the selected example than the influence of a change of work conditions. A change in the allowed job time in this case also results in a change in the number and types of machines employed and in the assignment of the machines to the various elements of the job.

If conditions during the operations are less favourable than those assumed in the estimate, failure to adapt the equipment to the job may cause the allowed job time to be exceeded, the contractors having to pay a penalty in consequence.

The determination of the minimum cost in the discrete method proves in most cases to be time consuming. For this reason only the first discrete solution found by the computer is supplied. In the computations various cost-determining factors (e.g. damages and repairs) are not included. These cost can be introduced however, in the cost job time matrix and thus be incorporated in the optimization process.

7. In hydraulic earthmoving, given the type of machinery and types of soil, the output is determined by the transport distance and the possible concentration of solids in the discharge line (Tables 16, 17 and 18). An increase of the transport distance tends to cause a less performance through a reduction of the mixture output (increase in resistance). If transport distance is increased, it is also possible that the concentration of solids in the liquid should be reduced to prevent exceedance of the critical speed. Apart from the limitations at the suction and discharge side of the suction dredge the concentration of solids is also determined upon the requirement that the output of solids must be coped with at the dumping site (time needed to couple or uncouple the piping). The limitations at the suction and discharge side of the suction dredge affect the maximum concentration at the suction side, the maximum allowable underpressure, and the critical speed. Because of the mentioned limitations hydraulic earthmoving cannot be applied to all allowed job times (Tables 20 and 21).

Table 23 shows the cost of completion with the dredge machinery required. With the procedures selected the cost of hydraulic earthmoving is of the same order as that of operations with dry earthmoving (Figure 12) under favourable conditions (in both cases exclusive transport cost of equipment).

7. GEBRUIKTE SYMBOLEN
List of used symbols

Symbool *Symbol*		Omschrijving *Interpretation*	Dimensie *Dimension*
a_i	=	aanvoerkosten voor één machine van het type i *cost of transport of one machine type* i	–
b	=	lengte van het bulldozerblad (m) *length of bulldozer blade (m)*	l
b_b	=	nuttige lading van de bulldozer (losse m^3) *payload of bulldozer (loose m^3)*	l^3
b_g	=	bakinhoud van de graafmachine (m^3) *bucket capacity of excavator (m^3)*	l^3
b_t	=	bakinhoud van het transportmiddel (m^3) *bucket capacity of haul unit (m^3)*	l^3
C	=	uitvoeringskosten, inclusief aanvoerkosten, van het gehele werk *cost of total job, including cost of machinetransport*	–
$c_{i,j}$	=	uitvoeringskosten, inclusief machine-aanvoerkosten, voor onderdeel j door machinetype i *cost of element* j *of job, including cost of machine transport by machine type* i	–
d_i	=	gedeelte i van de transportafstand winplaats-stort (m) *part* i *of distance place of loading to dumping location (m)*	l
d_j	=	gedeelte j van de transportafstand stort-winplaats (m) *part* j *of distance dumping location to place of loading (m)*	l
e	=	faktor voor de bladvorm van een bulldozer *factor for shape of bulldozer blade*	-
F_{100}	=	theoretische bladinhoud van een bulldozer (m^3) *theoretical blade capacity of bulldozer (m^3)*	l^3
f_b	=	correctiefaktor op de bladbreedte van een bulldozer *correcting factor for width of bulldozer blade*	–
f_c	=	uitleveringsfaktor *swellfactor*	–
f_g		kosten per tijdseenheid graafmachine *cost per time unit of excavator*	–
f_t	=	kosten per tijdseenheid transportmiddel *cost per time unit of haul unit*	–
g_t	=	aantal vrachten per transportmiddel *number of loads per haul unit*	–
H	=	manometrische opvoerhoogte (m.w.k.) *total head (metres of water)*	l

Symbool *Symbol*		Omschrijving *Interpretation*	Dimensie *Dimension*
h	=	hoogte van het bulldozerblad (m) *height of bulldozer blade (m)*	l
h_i	=	kosten per tijdseenheid van machine i *cost per time unit of machine* i	–
i	=	machinetype *machine type*	–
j	=	onderdeel van een werk *job element*	–
K_{mt}	=	kosten voor de uitvoering met een graafmachine met m_t transportmiddelen ($m_t > n'_t$) *cost of completing a job executed by an excavator with* m_t *haul units* ($m_t \geqslant n'_t$)	–
K_{nt}	=	kosten voor de uitvoering met een graafmachine met n_t transportmiddelen ($n_t < n'_t$) *cost of completing a job executed by an excavator with* n_t *haul units* ($n_t < n'_t$)	–
$k_{i,j}$	=	uitvoeringskosten, exclusief aanvoerkosten, voor onderdeel j door machinetype i *cost of completing element* j, *exclusive cost of machine transport, by machine type* i	–
k_t	=	transportconcentratie *transport concentration*	–
$k_{t2,3}$	=	transportconcentratie van de fractie 50–150 μ en 150–2000 μ *transport concentration of grain size range 50–150* μ *and 150–2000* μ	–
L_p	=	lengte van de persbuis (m) *length of discharge pipe (m)*	l
M	=	hoeveelheid te verplaatsen grond over een bepaalde afstand (m^3) *quantity of soil to be moved over a certain distance* (m^3)	l^3
M_e	=	koppel (m kg) *torque (m kg)*	ml
m_t	=	geheel aantal transportmiddelen bij continu werkende graafmachine, waarbij wachttijden voor de transportmiddelen optreden ($m_t \geqslant n'_t$) *complete number of haul units needed for a continuously working excavator; there is downtime for the haul units* ($m_t \geqslant n'_t$)	–
N_e	=	vermogen in pk *capacity at shaft in hp*	$m\,l\,t^{-1}$

Symbool *Symbol*	Omschrijving *Interpretation*	Dimensie *Dimension*
n	= aantal transportmiddelen (algemeen) *number of transport units*	–
n_p	= toerental pomp (omwentelingen per minuut) *number of revolutions per minute of suction pump*	–
n'_t	= aantal transportmiddelen bij continu werkende graafmachine, waarbij ook fracties van transportmiddelen kunnen worden ingezet (geen wachttijden voor transportmiddelen) *number of hauling units used with a continuously working excavator; it is assumed that a fraction of a haul unit can be used (continuous flow for the haul units)*	–
p	= aantal gedeelten van de transportweg (winplaats-stort) met verschillende kwaliteiten voor de berijdbaarheid (transportsnelheid) *number of stretches of transport route with various qualities regarding trafficability (speed of transport)*	–
pv	= poriënvolume in % *pore volume*	–
Q	= debiet ($m^3\ sec^{-1}$) *discharge ($m^3\ sec^{-1}$)*	$l^3\ t^{-1}$
Q_p	= productie in gestort zand (inclusief poriënvolume ($m^3 sec^{-1}$) *output in solids (including pore volume) ($m^3\ sec^{-1}$)*	$l^3\ t^{-1}$
q	= aantal gedeelten van de transportweg (stort-winplaats) met verschillende kwaliteiten voor de berijdbaarheid (transportsnelheid) *number of stretches of transport route with indications of qualities regarding trafficability (speed of transport)*	–
T	= gestelde termijn (>0) voor de uitvoering van een werk (sec) *period fixed for completing a job (sec)*	t
T_b	= uitvoeringstijd voor een bulldozer (sec) *time for completing a job by a bulldozer (sec)*	t
T_{mt}	= uitvoeringstijd graafmachine bij m_t transportmiddelen ($m_t \geqslant n'_t$) (sec) *cost of completing a job in case of an excavator with m_t haul units ($m_t \geqslant n'_t$) (sec)*	t
T_{nt}	= uitvoeringstijd bij n_t transportmiddelen ($n_t < n'_t$) (sec) *time of completing a job in case of n_t haul units ($n_t < n'_t$) (sec)*	t
t_e	= $t_s + t_m + t_{lo} + t_{wr}$; de som van de schakel- en manoeuvreertijden, lostijd en wachttijden tijdens het transport. De som wordt als een constante beschouwd, de zogenoem-	

Symbool *Symbol*		Omschrijving *Interpretation*	Dimensie *Dimension*
		de 'vaste tijd' (sec) $t_s + t_m + t_{lo} + t_{wr}$; *the sum of times lost in changing gears, manoeuvers, unloading and downtime during transport. This sum is regarded as constant, the so-called fixed time (sec)*	t
t_f	=	tijd nodig voor vullen van graafmachinebak (sec) *time required for filling excavator bucket (sec)*	t
t_g		cyclustijd voor een graafmachine (sec) *time cycle for excavator (sec)*	t
t_k	=	tijd nodig voor aan- en afkoppelen van een getrokken bak aan een motorisch gedeelte (sec) *time required for coupling and uncoupling of haul unit and engine unit (sec)*	t
t_m	=	tijd nodig voor manoeuvreren bij laad- en stortplaats (sec) *time required to manoeuver at loading place and dumping area (sec)*	t
t_p	=	tijd nodig voor verplaatsen van graafmachine (sec) *time required for moving excavator (sec)*	t
t_r	=	samenvoeging van t_{rv} en t_{rl} zodanig, dat over de transportafstand (heen en terug) met het gemiddelde van de snelheden van een geladen en leeg transportmiddel wordt gereden (gemiddelde snelheid) (sec) *combination of* t_{rv} *and* t_{rl} *in such a way that the transport route (there and back) is covered at the mean speed of an empty and a loaded haul unit (sec)*	t
t_s	=	tijd nodig voor schakelen, optrekken, afremmen e.d. (sec) *time required for changing gears, acceleration, braking, etc. (sec)*	t
t_t	=	cyclustijd transportmiddel (sec) *cycle time for haul unit (sec)*	t
t_z	=	cyclustijd zelfladende-transporterende-lossende machines (sec) *cycle time for self-loading, -transporting and -unloading machines (sec)*	t
$t_{i,j}$	=	uitvoeringstijd geheel onderdeel j door één machinetype i (sec) *time for completing element* j *by one machine type* i *(sec)*	t
t_{la}	=	tijd nodig voor laden van transportmiddel (sec) *time required for loading haul unit (sec)*	t
t_{lb}	=	tijd nodig voor lossen van graafmachinebak (sec) *time required for discharging excavator bucket (sec)*	t
t_{lo}	=	tijd nodig voor lossen van transportmiddel (sec) *time required for unloading haul unit (sec)*	t

Symbool *Symbol*	Omschrijving *Interpretation*	Dimensie *Dimension*
t_{rl}	= transporttijd van een leeg transportmiddel (sec) *transport time of an empty haul unit (sec)*	t
t_{rv}	= transporttijd van geladen transportmiddel (sec) *transport time of a loaded haul unit (sec)*	t
t_{wg}	= wachttijden van transportmiddel op graafmachine (sec) *downtime of haul unit for excavator (sec)*	t
t_{wl}	= wachttijden ter plaatse van het stort (sec) *downtime at dumping area (sec)*	t
t_{wr}	= wachttijden die optreden tijdens transport (b.v. wisselplaatsen) (sec) *downtime during transport (sec)*	t
t_{wt}	= wachttijd graafmachine op te laden transportmiddel (sec) *downtime of excavator (sec)*	t
t_{zl}	= tijd nodig voor manoeuvreren van lege graafmachinebak in graafpositie (sec) *time required for putting empty excavator bucket into digging position*	t
t_{zv}	= tijd nodig voor manoeuvreren van volle graafmachinebak in stortpositie (sec) *time required for putting excavator bucket into dumping position (sec)*	t
U	= af te leggen afstand heen en terug; aangenomen wordt, dat heenweg = terugweg (U = 2 keer de transportafstand) (m) *distance to be covered (there and back); it is assumed that both distances (there and back) are equally long (U = twice the transport route) (m)*	l
v	= gemiddelde snelheid (m sec^{-1}) *mean speed (m sec^{-1})*	$l\,t^{-1}$
$v_{l,j}$	= snelheid leeg transportmiddel op traiect d_j (m sec^{-1}) *speed of empty haul unit on route* d_j *(m* sec^{-1}*)*	$l\,t^{-1}$
$v_{v,i}$	= snelheid geladen transportmiddel op traject d_i (m sec^{-1}) *speed of loaded haul unit on stretch* d_i *(m* sec^{-1}*)*	$l\,t^{-1}$
$x_{i,j}$	= fractie van onderdeel j, uitgevoerd door machinetype i *fraction of element* j, *executed by machinetype* i	–
ij_i	= aantal machines van type i *number of machines of type* i	–
η	= rendement *efficiency*	–

8. LITERATUUR

ANDREAE, J. F. R., Vergelijking diverse transportmiddelen. Hydraulisch transport van waterzandmengsels. Studiedag NIRIA 23 maart 1972.

ANONYMUS, Verhuur van grondverzetmachines. Het Machinepark **5** (1970).

BENEDICT, R., J. WAIT, W. WILKES and W. HARRIS, Land Grading and Leveling Programs For Digital Computers. University of Arkansas Division of Agriculture, Fayetville, Arkansas (1964).

BOS, H., L. M. ZWAN en M. A. NEDERBURGH, Het samenstellen van het kavelinrichtingsplan van de ruilverkaveling 'Stoppeldijk' aan de hand van proefcomplexen. Meded. van de Cultuurtechnische Dienst **38** (1962).

BOS, R. J., Een computer-experiment met het grondtransportschema. Cultuurtechnisch Tijdschrift **9** (1969) 99–105.

BREE, S. E. M. DE, Baggerpompen. Hydraulisch transport van water-zandmengsels. Studiedag NIRIA 23 maart 1972.

BUSSER, J. W. en A. W. MIJNLIEFF, Een egalisatieberekeningsmethodiek waarbij gebruik gemaakt wordt van lineaire programmering. Cultuurtechnisch Tijdschrift **6** (1972).

BIJKERK, C., Alternatieve plannen voor de kavelinrichting in de ruilverkaveling 'Nijeveen-Kolderveen'. Meded. van de Cultuurtechnische Dienst **6** (1959).

CATERPILLAR TRACTOR CO., Fundamentals of earthmoving (1965).

CULTUURTECHNISCHE DIENST, Voorschriften en Mededelingen.

CULTUURTECHNISCHE DIENST, Jaarverslag 1970.

DERKSEN, W. N. M., Gebruik computer voor keuze grondverzetsmachines. Het Machinepark **4** (1969).

DETTMERS, D., Folgerungen aus den Versuchen über die Förderung von Sand-Wasser-Gemischen in Rohrleitungen. Techn. Hochschule Hannover, Franzius Institut für Grund- und Wasserbau, Heft **23** (1963).

DUIN, R. H. A. VAN en G. A. C. VAN BALLEGOOYEN, Kavelinrichting in de ruilverkaveling 'Het land van Heusden en Altena'. Meded. van de Cultuurtechnische Dienst **5** (1959).

DUIN, R. H. A. VAN, D. VAN DEN BOSCH en F. VON GERHARDT, Alternatieve plannen voor de landinrichting in de ruilverkaveling 'Raamsdonk'. Meded. van de Cultuurtechnische Dienst **23** (1960).

DUIN, R. H. A. VAN en L. EELKEMA, Kavelinrichting en grondverzet in de ruilverkaveling 'Amerkant'. Meded. van de Cultuurtechnische Dienst **44** (1962).

DUIN, R. H. A. VAN en TH. J. LINTHORST, De invloed van de grondverzetsafstand op de keus van het transportmiddel. Cultuurtechnisch Tijdschrift **2** (1962/1963) 141–155.

FÜHRBÖTER, A., Über die Forderung von Sand-Wasser-Gemischen in Rohrleitungen. Diss. (1961) Techn. Hochschule Hannover Franzius-Institut für Grund- und Wasserbau.

GIBERT, R., Transport hydraulique et refoulement des mixtures en conduites. Ann. Ponts et Chaussées 130 (1960) 3 307–373.

GILST, W. J. VAN, Machines op Cultuurtechnische Werken in Nederland. Instituut voor landbouwtechniek en rationalisatie **75** (1963).

KAMPEN, J. H. VAN, Optimizing Harvesting Operations on a Largescale Grain Farm. Diss. (1969) Landbouwhogeschool, Wageningen.

KESTER, J. A. en J. B. SPRIK, Landinrichtingsonderzoek in het fries-groningse kleimozaïekgebied. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, nota 709 (1972).

KONINKLIJKE NEDERLANDSE HEIDE-MAATSCHAPPIJ, Calculatie Vademecum (1963).

KRIJGER, P. D. en A. WEMMENHOVE, Berekening van kosten en baten voor 3 alternatieve plannen van een complex gronden in de ruilverkaveling 'Het Grootslag'. Meded. van de Cultuurtechnische Dienst **17** (1960).

KÜHN, G., Der Gleislose Erdbau. Springer-Verlag, Berlin (1956).

KÜHN, G., Die Einsatzprobleme des Schürfkübelbaggers. Bauverlag G.m.b.H. Wiesbaden-Berlin (1958).
LAMBREGTS, C. P. en P. J. DIELEMAN, Alternatieven bij de uitvoering van kavelinrichting in de Tielerwaard West. Meded. van de Cultuurtechnische Dienst **1** (1959).
MIJNLIEFF, A. W., Toepassing van simulatietechniek bij kavelinrichtingsbegrotingen. Cultuurtechnisch Tijdschrift **4** (1968/1969).
MIJNLIEFF, A. W. en J. W. BUSSER, Berekening uitvoeringstijd en -kosten voor de uitvoering van een werk met graafmachines en transportmiddelen, bulldozers en hydraulisch grondverzet. Nota Afdeling Onderzoek Provinciale Directie van de Cultuurtechnische Dienst Friesland (1970).
MIJNLIEFF, A. W. en J. W. BUSSER, Hydraulisch grondverzet. Meded. van de Cultuurtechnische Dienst **81** (1970).
MIJNLIEFF, A. W. en J. W. BUSSER, Hydraulisch grondverzet. Cultuurtechnisch Tijdschrift **13** (1973).
NEDERLANDS INSTITUUT VAN AANNEMERS GROOTBEDRIJF (N.I.V.A.G.), Kostennormen voor aannemers-materiaal. N. Samson N.V. Alphen aan de Rijn (1967).
NICHOLS, H. L., Moving the earth. 2e edition (1962).
OOSTRA, A. D., Alternatieve plannen voor kavelinrichtingswerk in complex 62 van de 'Zak van Zuid-Beveland'. Meded. van de Cultuurtechnische Dienst **2** (1959).
OOSTRA, A.D., Kosten en baten van alternatieve plannen voor een deel van het Lollebeekdal. Mededelingen I.C.W. **39** (1962).
PRIM, R. C., Shortest Connection Networks And Some Generalizations. Bell System Technical Journal **36** (1957) 1389–1401.
ROORDA, A. en J. J. VERTREGT, Floating dredges. Techn. Uitg. H. Stam, Haarlem (1963).
SCHOSZ, W., Elektronische Datenverarbeitung als Hilfsmittel für die Kalkulation und Organisation von Erdbaustellen. Strassen- und Tiefbau **4** (1966).
SOL, R. H., Kostenvergelijking van vier alternatieve plannen voor een beekdal in de ruilverkaveling 'Lollebeek'. Rapport 14 Inst. Cultuurtechn. Waterhuish. (1962).
STEPANOFF, A. J., Pumps and blowers. Two-phase flow. John Wiley & Sons Inc. New York (1965).
VERHAGEN, A., Uitvoering van grondwerk op cultuurtechnische projecten. Cultuurtechnische verhandelingen. Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage (1969) 223–246.
VERHAGEN, A., Efficiënt werken met draglines. Techn. Uitg. H. Stam, Haarlem (1963).
VISSER, P., Enige beschouwingen over de methode van algehele egalisatie tot een vlak waarbij minimaal grondtransport en minimale transportafstand verzekerd is. Meded. van de Cultuurtechnische Vereniging I (1959) 73–93.