



Spinoza

metingen aan de warmtewisselaar
winterperiode 1999-2000

Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat



Dienst Weg- en Waterbouwkunde

SPINOZA

metingen aan de warmtewisselaar
winterperiode 1999-2000

- definitief -

Rijkswaterstaat - Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Postbus 5044
2600 GA DELFT

PN 01/9211-1
Assen, 20 juli 2000 Grontmij Drenthe - Adviesgroep Geotechniek

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	3
2	Begrippen.....	4
2.1	Algemeen	4
2.2	Begrippenlijst.....	4
3	Warmtewisselaar - opbouw en experimenten.....	5
3.1	Opbouw warmtewisselaar	5
3.2	Metingen aan de warmtewisselaar	5
3.3	Beschrijving van het meetprogramma	7
4	Berekening afgegeven vermogen	8
5	Resultaten.....	9
5.1	Algemeen	9
5.2	Debietmetingen.....	9
5.3	Temperatuurverloop water-glycolmengsel	9
5.4	Temperatuurverloop wegdekoppervlak en afgegeven vermogen...	10
5.5	Temperatuurverdeling in warmtewisselaar	11
6	Conclusies en aanbevelingen	12

1 Inleiding

Onderdeel van het SPINOZA-project (SPoelsysteem voor INnovatief Onderhoud van Zeer open Asfaltbeton) is een experiment met een warmtewisselaar in het wegdek.

Een warmtewisselaar in het wegdek is in grote lijnen te vergelijken met vloerverwarming, zoals die wordt toegepast in woonhuizen. Een warmtewisselaar kan worden toegepast om tijdens warme perioden het wegdek te koelen en tijdens koude perioden het wegdek te verwarmen. De aan het wegdek onttrokken warmte kan worden toegepast voor de winning van energie. De afkoeling van het wegdek die hiermee gepaard gaat heeft mogelijk een positief effect op het benodigde onderhoud en de levensduur. Het toevoegen van warmte aan het wegdek kan worden toegepast tijdens koude perioden voor de bestrijding van gladheid op kwetsbare punten.

Rijkswaterstaat voert op dit moment eveneens een experiment uit met een warmtewisselaar in het wegdek nabij de Haringvlietsluizen. Het experiment op het proefvak nabij Anloo onderscheidt zich van het experiment bij de Haringvlietsluizen, doordat de leiding van de warmtewisselaar dicht bij het wegdekoppervlak ligt. Dit zorgt voor een efficiëntere overdracht van energie. Verder kan tijdens de experimenten de temperatuur en het debiet van het water-glycolmengsel in de leiding goed worden beheerst. Door deze parameters te variëren kan inzicht worden verkregen in de invloed van het debiet en de temperatuur van de vloeistof in het leidingsysteem op de temperatuurverdeling in, en het rendement van de warmtewisselaar.

Het onderwerp van dit rapport zijn de metingen die zijn uitgevoerd in de winter van 1999-2000. Deze serie metingen is een vervolg op de metingen die zijn uitgevoerd in de zomer van 1999.

Het doel van de meetcampagne is het verzamelen van gegevens, die dienen ter ondersteuning voor een haalbaarheidsstudie naar de toepasbaarheid van een warmtewisselaar in het wegdek. Met de meetgegevens kan onder meer een inschatting worden gemaakt van de energetische aspecten van een warmtewisselaar in het wegdek. Verder kan door het variëren van de temperatuur en stroomsnelheid van de vloeistof in de leidingen worden vastgesteld in welke mate de oppervlaktetemperatuur van het wegdek kan worden beïnvloed.

De warmtewisselaar is aangebracht in een afgesloten rijstrook langs de N34 ter hoogte van kilometerpaal 101 nabij Anloo (zie bijlage 1). In opdracht van Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde heeft Grontmij de metingen uitgevoerd en voorzien van een eerste analyse. In dit rapport worden de resultaten van de metingen en de eerste analyse gepresenteerd.



2 Begrippen

2.1 Algemeen

Om onduidelijkheid te voorkomen over de inhoud van de begrippen die worden gebruikt in dit rapport is een verklarende begrippen/woordenlijst toegevoegd. Naast een korte omschrijving van de inhoud van de begrippen is voor een aantal gevallen een beschrijving gegeven van de discussie die tijdens de metingen over dat onderwerp heeft plaatsgevonden.

2.2 Begrippenlijst

koel-verwarmingsinstallatie - De temperatuur van het water-glycolmengsel wordt tijdens de experimenten constant gehouden. Dit gebeurt met een gecombineerde koel-verwarmingsinstallatie. Het koel- en het verwarmingsgedeelte kunnen niet gelijktijdig werkzaam zijn. Voor deze serie experimenten was de verwarmingsinstallatie ingeschakeld. Bij experimenten met een hoge temperatuur van het asfalt en een relatief lage (begin)temperatuur van het water-glycolmengsel kan dit dus inhouden dat de temperatuur van het wegdek hoger is dan de ingestelde temperatuur. In deze situatie wordt energie opgenomen in plaats van afgegeven.

meteorologisch station - Op het proefvak is een meteorologisch station aanwezig van Mierij Meteo. De meetapparatuur registreert een aantal standaard meteorologische variabelen als de luchttemperatuur, de neerslag, de windrichting en -snelheid en de inkomende kortgolelige straling (globale warmtestroomdichtheid). De gegevens zijn gemeten met een frequentie van één keer per minuut met behulp van een datalogger van het type CR10 (Campbell Scientific). De metingen zijn opgeslagen met een frequentie van één keer per tien minuten. De opgeslagen waarde is dus de gemiddelde temperatuur voor een interval van tien minuten.

Behalve de meteorologische variabelen wordt op twee locaties de temperatuur van het wegdek geregistreerd op drie dieptes. Dit betreft eveneens gemiddelde waarden over tien minuten.

temperatuursensor - Bij de experimenten zijn verschillende typen sensoren toegepast voor het meten van de temperatuur. Er is zowel gebruik gemaakt van PT100 sensoren (weerstand is functie van de temperatuur) als thermokoppels (K-TT 24, spanning is functie van de temperatuur). In dit rapport wordt tussen deze sensoren geen onderscheid gemaakt.

water-glycolmengsel - Door de warmtewisselaar wordt een vloeistof gepompt met een verlaagd vriespunt bestaande uit een water-glycolmengsel (60% water, 40% glycol).

warmtewisselaar - De term warmtewisselaar heeft betrekking op de totale installatie en niet enkel de leiding door het wegdek

3 Warmtewisselaar - opbouw en experimenten

3.1 Opbouw warmtewisselaar

De warmtewisselaar bestaat uit een kunststof leiding (PEX), die is aangebracht onder de ZOAB deklaag. De leiding heeft een uitwendige diameter van 20 mm en een wanddikte van 2 mm (inwendige diameter 16 mm). Met behulp van een pomp wordt een mengsel van water en glycol (40% glycol), vanuit een buffervat, door de leiding gepompt.

Het water-glycolmengsel in het buffervat wordt op temperatuur gehouden door een koel-/verwarmingsinstallatie (zie bijlage 2). De installatie begint te koelen/verwarmen, wanneer de temperatuur van de vloeistof in het buffervat meer dan 0,5 °C afwijkt van de vooraf ingestelde temperatuur. Het debiet door de leiding wordt geregeld met een nauwkeurig in te stellen afsluiter (type STAD 15/14).

De warmtewisselaar is verdeeld in drie secties, waarbij de secties onderling verschillen in de afstand tussen de lussen in de leiding. In sectie 1 is de afstand tussen de lussen van de leiding 0,50 m, in de secties 2 en 3 respectievelijk 0,30 m en 0,15 m. De oppervlakte van de secties die worden beïnvloed door het leidingsysteem is vastgesteld op respectievelijk 12,25 m², 7,35 m² en 2,10 m².

In de oorspronkelijke proefopzet zou het water-glycolmengsel bij sectie 1 de warmtewisselaar intreden en bij sectie 3 weer verlaten. Om de geometrie van de verschillende secties beter tot zijn recht te laten komen, is bij de aanleg van de warmtewisselaar besloten het water-glycolmengsel bij sectie 3 de warmtewisselaar te laten intreden. In deze proefopzet moet het water-glycolmengsel een langere weg afleggen voordat de vloeistof de eerste sectie instroomt. Dit betekent dat een geringe koeling/opwarming van de vloeistof kan optreden. Om dit effect te beperken is de aanvoerleiding zo goed mogelijk geïsoleerd.

3.2 Metingen aan de warmtewisselaar

Temperatuurmetingen - De metingen aan de warmtewisselaar bestaan hoofdzakelijk uit temperatuurmetingen. Aan het begin en einde van iedere sectie wordt de temperatuur van het water-glycolmengsel gemeten in het midden van de leiding. Verder wordt de temperatuur gemeten tussen de lussen van de leiding in het wegdek (op verschillende dieptes) en in iedere sectie op de leiding en er boven. Behalve de temperatuurmetingen binnen het beïnvloedingsgebied van de warmtewisselaar wordt de temperatuur van het wegdek bepaald op enige afstand hiervan. Deze waarden kunnen worden gebruikt om de vergelijking mogelijk te maken tussen de wegdektemperaturen die optreden binnen en buiten het beïnvloedingsgebied van de warmtewisselaar. Deze referentietemperaturen zijn zowel met de meetapparatuur bij de warmtewisselaar, als met het hierna te beschrijven meteorologisch station uitgevoerd. Voor een overzicht van de locatie van de temperatuursensoren wordt verwezen naar bijlage 3. In de hierna volgende tabel staat beschreven waar en op welke diepte de temperatuursensoren zijn geplaatst.

Tabel 3-1 Positie temperatuursensoren in warmtewisselaar

nummer	Locatie	diepte onder oppervlak (cm)
7, 14, 21	in het water-glycolmengsel aan het begin van iedere sectie	8,5
1, 8, 15	in het water-glycolmengsel aan het einde van iedere sectie	8,5
2, 9, 16	op de leiding	7,5
3, 10, 17	direct onder de deklaag van ZOAB	5,0
4, 11, 18	zo dicht mogelijk onder het oppervlak van het wegdek	0,5
5, 12, 19	in iedere sectie tussen de lussen van het leidingsysteem direct onder de deklaag van ZOAB	5,0
6, 13, 20	in iedere sectie tussen de lussen van het leidingsysteem zo dicht mogelijk onder het oppervlak van het wegdek	0,5
22	Referentietemperatuursensor buiten de warmtewisselaar direct onder de deklaag van ZOAB	5,0
23	Referentietemperatuursensor buiten de warmtewisselaar zo dicht mogelijk onder het oppervlak van het wegdek	0,5

De temperaturen in de warmtewisselaar zijn gemeten met een frequentie van één keer per tien minuten met behulp van een datalogger van het type 21X (Campbell Scientific). De metingen zijn opgeslagen met een frequentie van één keer per tien minuten. De opgeslagen waarde is dus één meting die representatief is verondersteld voor een interval van tien minuten.

De referentietemperaturen (meteorologisch station) zijn gemeten met een frequentie van één keer per minuut met behulp van een datalogger van het type CR10 (Campbell Scientific). De metingen zijn opgeslagen met een frequentie van één keer per tien minuten. De opgeslagen waarde is dus de gemiddelde temperatuur voor een interval van tien minuten.

Meteorologische metingen – De hoeveelheid energie die wordt opgenomen (zomerperiode) of afgegeven (winterperiode) door de warmtewisselaar, wordt bepaald door de meteorologische omstandigheden. De inkomende kortgolvi-ge straling (de kracht van de zonnestraling) bepaalt voor een groot deel de temperatuur van het asfalt. Hoe minder straling binnenkomt hoe lager de temperatuur van het asfalt. Deze meteorologische grootheid wordt gemeten met een stralingsmeter en levert de hoeveelheid energie per oppervlakte eenheid (W/m^2). Verder wordt de energiebalans van de warmtewisselaar beïnvloed door factoren als de wind en het vochtgehalte van het wegdek (energie wordt gebruikt voor de verdamping van water, dit leidt tot afkoeling van het wegdek). Om de invloed van deze parameters te kunnen bepalen worden de windrichting en -snelheid, de neerslag en de temperatuur van de buitenlucht gemeten. De meteorologische parameters worden gemeten met een frequentie van één keer per minuut met behulp van een datalogger van het type CR10 (Campbell Scientific). De gegevens zijn opgeslagen met een frequentie van één keer per tien minuten. De opgeslagen waarde is dus een gemiddelde voor een interval van tien minuten.

Debietmetingen – Om het vermogen dat wordt opgenomen/afgegeven door de warmtewisselaar te kunnen berekenen, moet het debiet waarmee het water-glycolmengsel door de leiding stroomt bekend zijn. Voor het nauwkeurig instellen van de afsluiter is gebruik gemaakt van apparatuur, die gewoonlijk wordt toegepast bij het afstellen van verwarmingsinstallaties (CBI van de firma Tour & Andersson Hydronics). Deze apparatuur heeft tevens de mogelijkheid tot het opslaan van de gemeten waarden. Het gemeten debiet is opgeslagen met een frequentie van één keer per twee minuten. Voor de berekeningen van het afgegeven vermogen is gebruik gemaakt van het rekenkundig gemiddelde van vijf metingen voor een interval van tien minuten.

3.3 Beschrijving van het meetprogramma

Het meetprogramma bestond uit een serie van acht metingen. De metingen verschilden onderling in de temperatuur van het water-glycolmengsel en de stroomsnelheid van het water-glycolmengsel door de warmtewisselaar. Eén en ander staat hieronder in een tabel samengevat.

Tabel 3-2 Overzicht meetprogramma en datum van uitvoering

experiment	debiet (l/s)	temperatuur water-glycolmengsel (°C)	datum van uitvoering
1	0.10	30	21 t/m 24 januari
2	0.04	30	24 t/m 26 januari
3	0.04	25	26 t/m 28 januari
4	0.10	25	28 t/m 31 januari
5	0.04	35	31 januari t/m 2 februari
6	0.10	35	2 t/m 4 februari
7	0.10	40	17 t/m 21 februari
8	0.04	40	21 t/m 23 februari

De metingen zijn uitgevoerd bij min of meer vergelijkbare weersomstandigheden. De voorwaarde voor het starten van een experiment was, dat de avond voorafgaand aan het experiment een kans op nachtvorst aan de grond werd verwacht.

Door de relatief zachte winter (vanaf januari 2000) is er maar een beperkt aantal keren nachtvorst aan de grond verwacht (en voorgekomen). Om toch een aantal metingen te hebben bij lage temperaturen is de voorwaarde dat er nachtvorst moest worden verwacht soepel gehanteerd.

4 Berekening afgegeven vermogen

De berekening van het afgestane vermogen is op de volgende wijze tot stand gekomen:

De hoeveelheid energie die vrijkomt bij de afkoeling van een bepaald volume vloeistof (met een bepaalde soortelijke warmte en soortelijk gewicht) met een aantal graden kan worden berekend met:

$$E = V \cdot C_p \cdot \rho \cdot \Delta T \quad [1]$$

E	= energie (J)
V	= volume (m^3)
C_p	= soortelijke warmte ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
ρ	= soortelijk gewicht ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
ΔT	= temperatuurverschil ($^\circ\text{C}$)

Het vermogen kan worden berekend door beide leden van de vergelijking te delen door de tijd:

$$\frac{E}{t} = \frac{V \cdot C_p \cdot \rho \cdot \Delta T}{t} \Rightarrow P = \Phi \cdot C_p \cdot \rho \cdot \Delta T \quad [2]$$

P	= vermogen (W)
Φ	= volumedebiet ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Omdat C_p en ρ afhankelijk zijn van de temperatuur, moet voor een exacte oplossing geïntegreerd worden over T :

$$P = \int_{T_1}^{T_2} \partial \Phi C_p \rho \cdot \partial T \quad [3a]$$

Wanneer wordt aangenomen dat de temperatuurafhankelijkheid van ρ verwaarloosbaar is, en voor die van C_p wordt uitgegaan van de volgende lineaire vergelijking (geldig voor het temperatuurbereik van -20°C tot $+40^\circ\text{C}$)

$$C_p = 5,85 \cdot T + 3412 \quad [3b]$$

wordt na substitutie en integratie gevonden:

$$P = \Phi \cdot \rho \cdot \{2,92 \cdot (T_2^2 - T_1^2) + 3412 \cdot (T_2 - T_1)\} \quad [4]$$



5 Resultaten

5.1 Algemeen

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de metingen weergegeven. Verder is een eerste analyse uitgevoerd. De selectie van de gepresenteerde gegevens is tot stand gekomen in overleg met Ir. R. Jutte van de Dienst Weg- en Waterbouwkunde.

5.2 Debietmetingen

Gedurende de experimenten is het debiet van het water-glycolmengsel door de warmtewisselaar gemeten. Hierbij zijn de meetwaarden met een frequentie van één keer per twee minuten opgeslagen. Voor de berekening van het afgegeven vermogen is het debiet omgerekend naar een gemiddelde waarde per tijdsinterval van tien minuten. In bijlage 4a t/m 4h staat het resultaat van de debietmetingen per experiment weergegeven. Per grafiek is het gemeten debiet uitgezet tegen de tijd. Op voorhand is aangenomen dat de fluctuatie van het debiet circa 10% van de ingestelde waarde zou bedragen. Deze onder- en bovengrenzen staan als een rode lijn in de grafiek weergegeven.

Uit de grafieken kan worden afgeleid, dat het debiet in de tijd bij nagenoeg alle experimenten oploopt. Het is niet duidelijk of dit het gevolg is van het instellen van een evenwicht in het systeem, een afwijking in de meetapparatuur of een instabiliteit in de pomp. Bij de meeste experimenten blijft het gemeten debiet binnen de vooraf verwachte marges, of in de buurt hiervan. Bij experiment 7 wordt de marge met circa 20% overschreden (een sprong in de gegevens). Een mogelijke verklaring is de volgende: De sprong volgt op een plotseling sterke toename van de hoeveelheid ingekomen kortgolvlige straling (met als gevolg een sterke toename van de omgevingstemperatuur). Deze sterke temperatuurverandering kan hebben geleid tot een verandering van de viscositeit van het water-glycolmengsel, waardoor mogelijk een instabiliteit in de pomp is opgetreden.

Bij de uitwerking van de gegevens is aangenomen, dat de debietmeter goed heeft gefunctioneerd en dat de waargenomen variaties in het debiet in werkelijkheid ook zijn opgetreden. Voor de berekening van het opgenomen vermogen is gerekend met het gemiddelde debiet zoals dat is berekend/gemeten voor het interval van de berekening.

5.3 Temperatuurverloop water-glycolmengsel

In bijlage 5a t/m 5h staat het temperatuurverloop van het water-glycolmengsel weergegeven. Per grafiek is de temperatuur aan het begin en het einde van iedere sectie uitgezet tegen de tijd, alsmede de omgevingstemperatuur. Verder staat op de rechter as de ingekomen kortgolvlige straling uitgezet. Uit de grafieken kan een aantal zaken worden afgeleid:

- De temperatuur van het water-glycolmengsel aan het begin van sectie 3 is bij alle experimenten lager dan aan het einde van sectie 3. Bij de experimenten 3, 5 en 8 kruisen de lijnen van het temperatuurverloop aan het begin en het einde van sectie 3. Beredeneerd kan worden, dat de temperatuur aan het einde van een sectie lager dient te zijn dan aan het begin van de sectie door de afgifte van energie. Dit duidt op het niet goed functioneren van de temperatuursensor aan het begin van sectie 3. Het valt op dat de gemeten temperaturen, bij een debiet van 0,04 l/s, redelijk overeen komen met de temperaturen die worden gemeten aan het begin van sectie 2. Bij een debiet van 0,10 l/s komen de temperaturen redelijk overeen met de waarden die worden gemeten aan het einde van sectie 2. Een nadere analyse van het signaal van deze sensor leert, dat de dagelijkse variatie in de gemeten temperaturen overeenkomt met die van de overige temperatuursensoren in het water-glycolmengsel. Verder is de amplitude van het zaag-tandpatroon (veroorzaakt door het inschakelen van de verwarmingsinstallatie) in dezelfde orde van grootte als die van de overige sensoren. Het lijkt erop dat de sensor wel goed temperatuurverschillen meet, maar dat de absolute temperatuur sterk afwijkt van de overige sensoren. In een eerder uitgevoerde analyse is al geconstateerd, dat omwisseling van de thermokoppeldraden hiervan niet de oorzaak is.
- Het temperatuurverloop van het water-glycolmengsel in experiment 5 heeft een afwijkend verloop. Bij dit experiment is duidelijk te zien dat de temperatuur in een tijdsbestek van twee dagen met tien graden afneemt. In principe moet de temperatuur van de vloeistof min of meer constant blijven. Een flinke daling in de omgevingstemperatuur zou dit kunnen verklaren, maar dit is niet waargenomen.
- De variatie van de temperatuur van het water-glycolmengsel volgt in beperkte mate het patroon van de omgevingstemperatuur. Dit effect is sterker aanwezig bij een laag debiet dan bij een hoog debiet van het water-glycolmengsel door de warmtewisselaar.
- In het temperatuurverloop van het water-glycolmengsel valt een zaag-tandpatroon waar te nemen, dat wordt veroorzaakt door het in- en uitschakelen van de verwarmingsinstallatie. De amplitude van de fluctuatie is in sectie 3 groter dan in sectie 1.
- Het temperatuurverschil tussen het begin en het einde van het water-glycolmengsel per sectie is groter bij een laag debiet dan bij een hoog debiet (bij gelijkblijvende temperatuur).
- Door het niet goed functioneren van de temperatuursensor in de leiding aan het begin van sectie 3 is het niet mogelijk te bepalen hoeveel energie is afgegeven tussen het buffervat en het begin van de warmtewisselaar.

5.4 Temperatuurverloop wegdekoppervlak en afgegeven vermogen

In bijlage 6a t/m 6h staat de oppervlaktetemperatuur van het wegdek op verschillende locaties in de warmtewisselaar uitgezet tegen de tijd, alsmede de omgevingstemperatuur. Het betreft de temperatuur van het wegdekoppervlak tussen de leidingen. Verder staat op de rechter as het afgegeven vermogen uitgezet tegen de tijd. Door het niet betrouwbaar functioneren van de temperatuursensor aan het begin van sectie 3, is voor deze sectie het afgegeven vermogen niet berekend. Uit de grafieken kan het volgende worden afgeleid:

- In sectie 2 wordt meer vermogen afgegeven dan in sectie 1. Dit wordt verklaard door de hogere temperatuur van het water-glycolmengsel in sectie 2 (grotere temperatuurgradiënt tussen de leiding en het wegdekoppervlak). Een andere reden voor het verschil in afgegeven vermogen is het verschil in afstand tussen de lussen van de leiding in de secties.
- De variatie in afgegeven vermogen is groter in sectie 2 dan in sectie 1. De lijn van het afgegeven vermogen volgt meer de lijn van het temperatuur-



verloop van het wegdek (grotere temperatuurgradiënt tussen de leiding en het wegdekoppervlak).

- De omgevingstemperatuur en de referentietemperatuur van het wegdekoppervlak liggen binnen een aantal graden.
- De oppervlaktetemperatuur van het wegdek in de secties 2 en 3 ligt in alle experimenten boven het nulpunt. De oppervlaktetemperatuur van het wegdek in sectie 1 daalt in de experimenten 1 en 2 tot beneden het nulpunt. De gemiddelde temperatuur van het water-glycolmengsel in sectie 1 bij experiment 2 bedraagt circa 12 graden. In combinatie met nachtvorst wordt het wegdek tussen de lussen (afstand 0,50 m) niet voldoende verwarmd om de weg vorstvrij te houden. De temperatuur van 12 graden komt overeen met de temperatuur van het grondwater.
- Door de zachte winter zijn er weinig metingen uitgevoerd met substantiële nachtvorst.

5.5 Temperatuurverdeling in warmtewisselaar

Een belangrijke functie van een warmtewisselaar tijdens koude perioden is het verwarmen van het wegdek. Een verhoging van de temperatuur van het wegdekoppervlak tot boven 0°C voorkomt de vorming van gladheid. Dit verhoogt de verkeersveiligheid en vermindert de behoefte tot het gebruik van strooizout.

Op blad 1 van bijlage 7 staat een geschematiseerde dwarsdoorsnede van de warmtewisselaar weergegeven. In de dwarsdoorsnede staat de positie aangegeven van de temperatuursensoren ten opzichte van het wegdekoppervlak. Op de bladen 2 t/m 5 van bijlage 7 staat per experiment de verdeling van de temperatuur in de warmtewisselaar weergegeven. De temperaturen in de figuren geven de gemiddelde temperatuur voor een periode van een uur weer bij de laagste omgevingstemperatuur tijdens een experiment. Uit de figuren kan het volgende worden afgeleid:

- De oppervlaktetemperatuur van het wegdek zakt ter plaatse van de referentietemperatuursensor (thermokoppel 23) enkel bij de experimenten 1, 2 en 7 tot beneden het nulpunt.
- De oppervlaktetemperatuur van het wegdek in sectie 1 zakt tot beneden het nulpunt bij de experimenten 1 en 2, bij de overige experimenten blijft de temperatuur boven het nulpunt. De oppervlaktetemperatuur van sectie 2 en 3 blijft bij alle experimenten boven het nulpunt.
- In een rechte lijn boven de leiding neemt de temperatuur in de warmtewisselaar sterk af met toenemende afstand tot de leiding. Het temperatuurverloop (verticaal vanaf het hart van de leiding) is niet-lineair.

Tabel 5-1 Overzicht laagste temperaturen wegdekoppervlak

experiment	datum	tijdstip	minimale temperatuur (°C)
1	24-01-2000	02:20	< 0
2	25-01-2000	08:50	< 0
3	27-01-2000	00:30	> 0
4	28-01-2000	18:30	> 0
5	02-02-2000	00:20	> 0
6	04-02-2000	04:40	> 0
7	21-02-2000	04:30	< 0
8	23-02-2000	03:50	> 0

6 Conclusies en aanbevelingen

Op basis van de verzamelde gegevens kan worden geconcludeerd dat de meetcampagne goed is verlopen. Op het niet functioneren van de temperatuursensor aan het begin van sectie 3 na (thermokoppel 21), heeft alle apparatuur naar behoren gewerkt.

Een voorzichtige conclusie op basis van deze eerste analyse is, dat het goed mogelijk is om de temperatuur van het wegdekoppervlak te verhogen tot boven 0°C (bij die omstandigheden waarbij in het algemeen gladheid optreedt, d.w.z. bij matige vorst). Bij de experimenten is een vermogen afgegeven in de secties 1 en 2, variërend van circa 100 tot 300 W/m^2 . Door het niet goed functioneren van thermokoppel 21 is het afgegeven vermogen voor sectie 3 niet bekend.

Het afgegeven vermogen ligt in de orde van grootte die is berekend met een tweetal thermische modelleringen^{1,2}. Bij de optredende omgevingstemperaturen, is de temperatuur van het wegdekoppervlak in de secties 2 en 3 continu boven de 0°C gebleven. In sectie 1 is de temperatuur wel tot beneden 0°C gedaald.

In het rapport van TNO² wordt de effectiviteit van het verwarmen van het wegdek uitgedrukt in een kritische buisafstand. De kritische buisafstand is de afstand tussen de lussen van de warmtewisselaar, waarbij met een bepaalde temperatuur van de vloeistof de temperatuur van het wegdek nog net boven 0°C blijft (bij een omgevingstemperatuur van -5°C).

Bij experiment 1 is de temperatuur in sectie 1 (bij een omgevingstemperatuur van -5°C en een temperatuur van het water-glycolmengsel van 20°C) rond 0°C . De afstand tussen de lussen in sectie 1 (0,50 m) is dus de kritieke buisafstand bij deze temperatuur van het water-glycolmengsel.

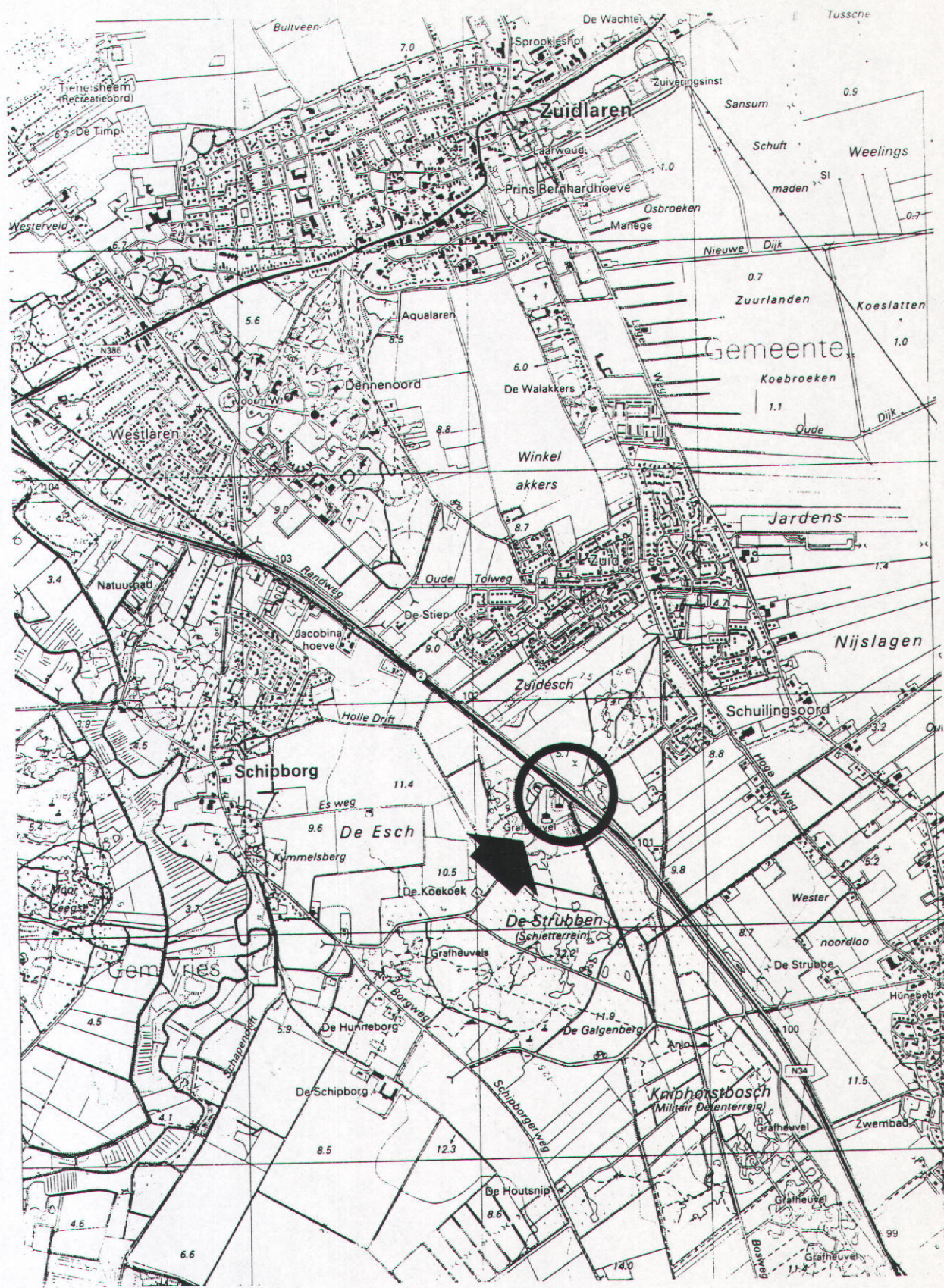
Met de hierboven vermelde randvoorwaarden is door TNO een kritieke buisafstand van 0,30 m berekend. De afwijking tussen de gemeten en de berekende kritieke buisafstand kan als volgt worden verklaard: Bij de thermische modellering zijn aannames gedaan voor de verschillende modelparameters. Doordat de parameters verschillen van de werkelijke situatie berekent het model afwijkende waarden.

De verwachte relatie tussen opgenomen vermogen, temperatuur en debiet van het water-glycolmengsel in de praktijk gevonden. Op basis van de opgedane ervaringen kunnen de volgende aanbevelingen worden gedaan:

- De temperatuursensor in het water-glycolmengsel aan het begin van sectie 3 (thermokoppel 21) lijkt, op basis van de meetgegevens, niet goed te functioneren (situatie onveranderd ten opzichte van vorige meetcampagne). Voor eventuele vervolggexperimenten wordt geadviseerd een sensor te plaatsen in de leiding, zo dicht mogelijk bij het punt waar deze het wegdek intreedt. Zo kan ook het opgenomen/afgegeven vermogen van sectie 3 worden berekend.



- Door de zachte winter zijn er weinig gegevens beschikbaar gekomen over de temperatuurverdeling in de warmtewisselaar bij lage temperaturen. Het lijkt zinvol om experimenten van langere duur uit te voeren (in een winterperiode). Bij deze aanvullende experimenten zou gemeten moeten worden met hogere en lagere temperaturen van het water-glycolmengsel, dan in de huidige experimenten zijn gebruikt. Op deze wijze wordt meer informatie verkregen over de werking van de warmtewisselaar over een groter temperatuurbereik.
 - Het afgegeven vermogen van sectie 3 zou kunnen worden gemodelleerd met behulp van thermische modellering. Hierdoor komt meer kennis beschikbaar over de relatie tussen afgegeven vermogen en optredende temperaturen binnen het invloedsgebied van deze sectie.
 - Wanneer een warmtewisselaar wordt toegepast om het wegdek te verwarmen tijdens koude periodes is het van belang dat de temperatuur van het water-glycolmengsel hoog blijft. Bij een lange leiding door het wegdek zal de temperatuur sterk afnemen en zal het verwarmend effect minimaal zijn. Dit kan worden ondervangen door het water-glycolmengsel met een groter debiet door de leiding te pompen, of de totale leiding op te delen in kleinere stukken. Verder kan er gevarieerd worden met de dikte van de leiding
- ¹ W.T. van Bijsterveld - Energie uit asfalt? - Een modelmatige beschouwing van constructieve en thermische aspecten
 - ² TNO Technisch Fysische Dienst – Spinoza: Spoelsysteem voor ZOAB – Opwarming ZOAB



Bron: Topografische Dienst Nederland

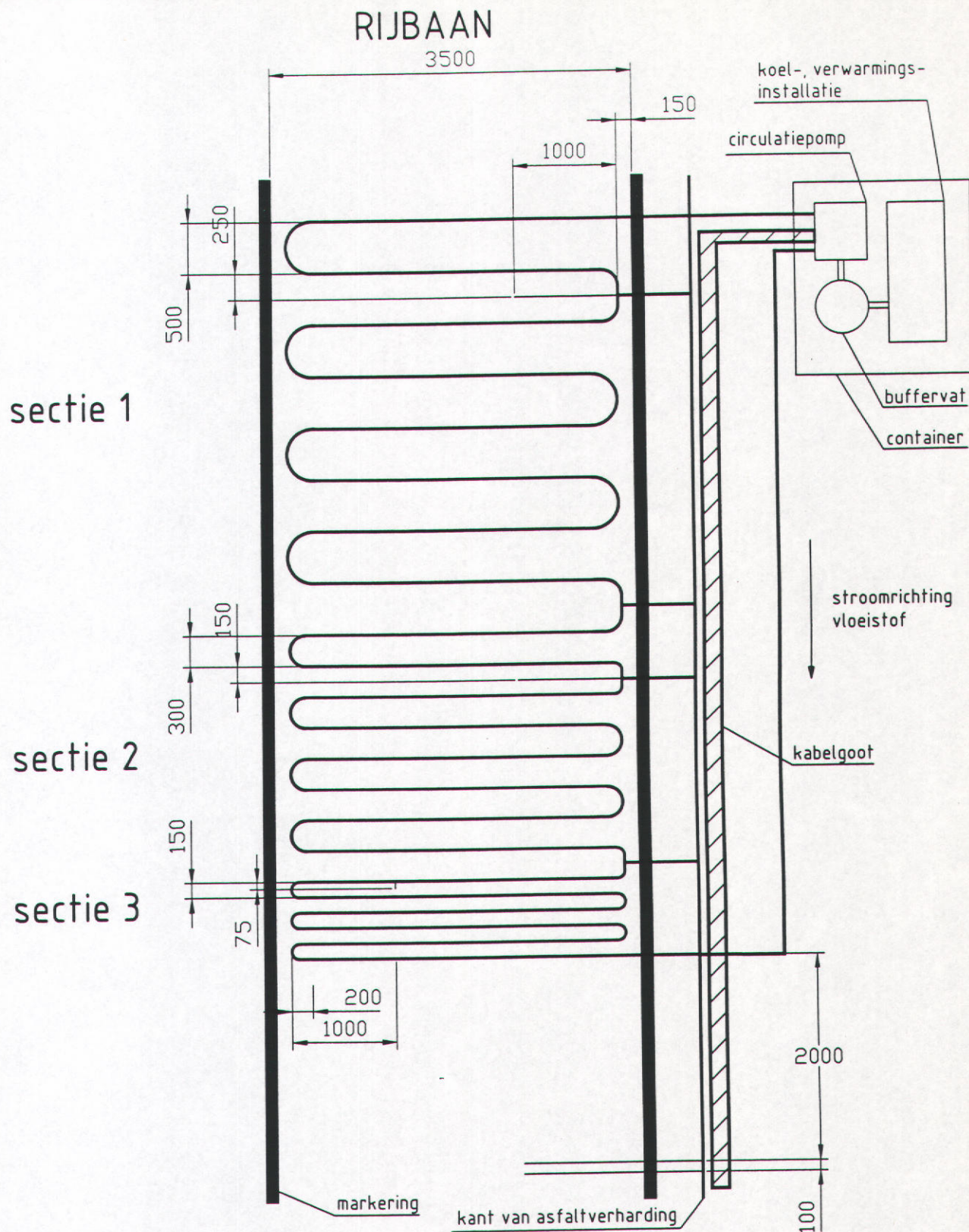


LIGGING LOCATIE

p.n. 01.9211.1

schaal: 1:25.000

bijlage: 1



Tekening niet op schaal
Maten in millimeters



Grontmij

Project **Spinoza**

Opdrachtgever **RIJKSWATERSTAAT**
dienst weg- en waterbouwkunde

Onderdeel **overzichtstekening**

Wijziging

Datum

Get. Contr. Akk. Projectnr.

Tekeningnummer Datum

Get.

Contr. Akk.

Bijlage in bladen, blad

0192111

01990942

22-11-99

C.W.

343 343

2

© Grontmij Groep Alle rechten voorbehouden

Bestand: 01990942 Geplaat op: 22-11-99

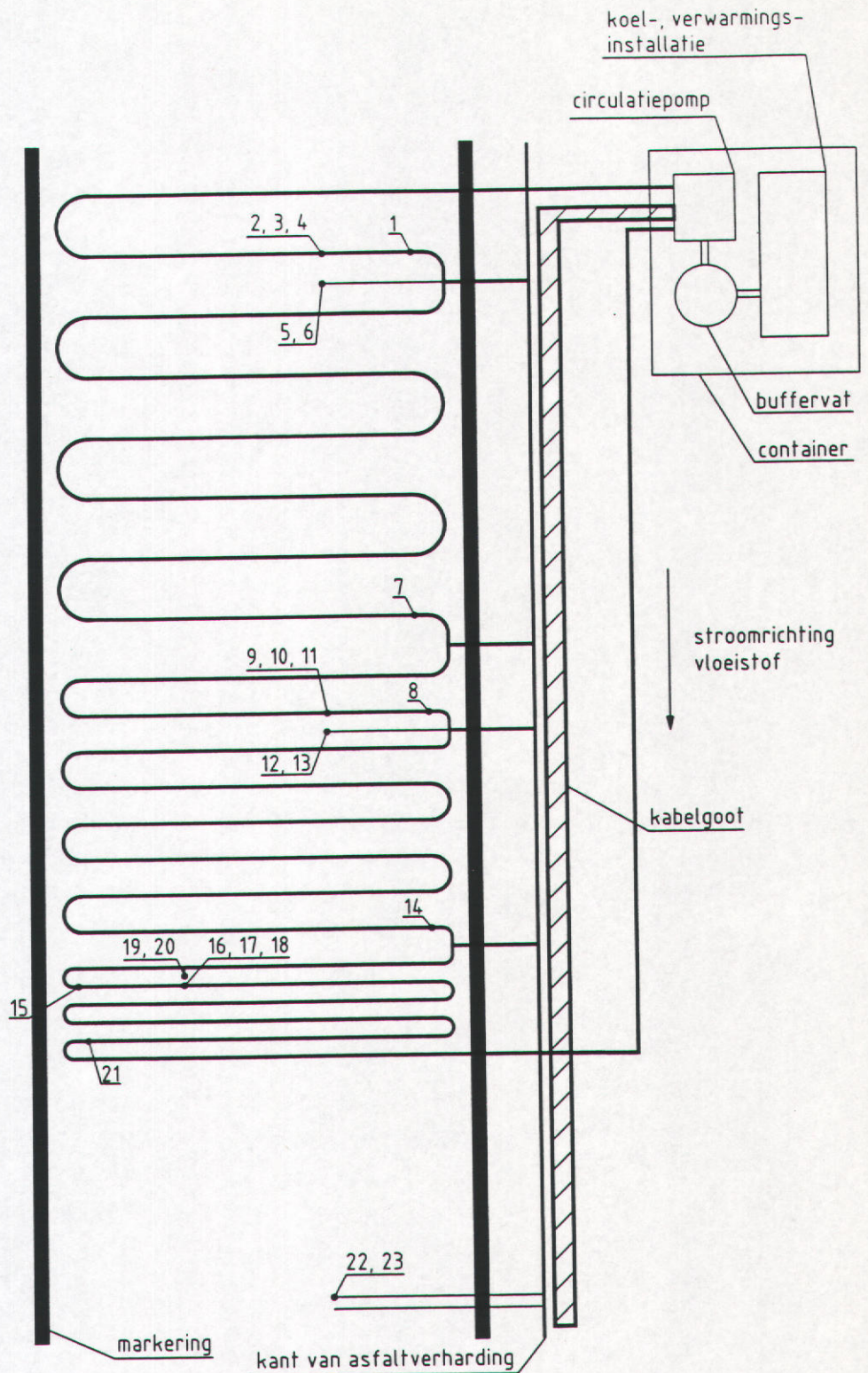
Grontmij
Advies & Techniek bv
Vestiging Drenthe
Stationsplein 12
Postbus 29
9400 AA Assen
Telefoon (0592) 33 88 99
Telefax (0592) 33 06 67

RIJBAAN

sectie 1

sectie 2

sectie 3



Tekening niet op schaal
Maten in millimeters



Grontmij

Project **Spinoza**

Opdrachtgever **RIJKSWATERSTAAT**
dienst weg- en waterbouwkunde

Grontmij
Advies & Techniek bv
Vestiging Drenthe
Stationsplein 12
Postbus 29
9400 AA Assen
Telefoon (0592) 33 88 99
Telefax (0592) 33 06 67

Onderdeel **overzichtstekening**

School
n.v.t.

Formaat
A4

Besteknummer

Wijziging

Datum

Get.

Contr.

Akk.

Projectnr.

Tekeningnummer

Datum

Get.

Contr.

Akk.

Bijlage in bladen, blad

0192111

01990943

22-11-99

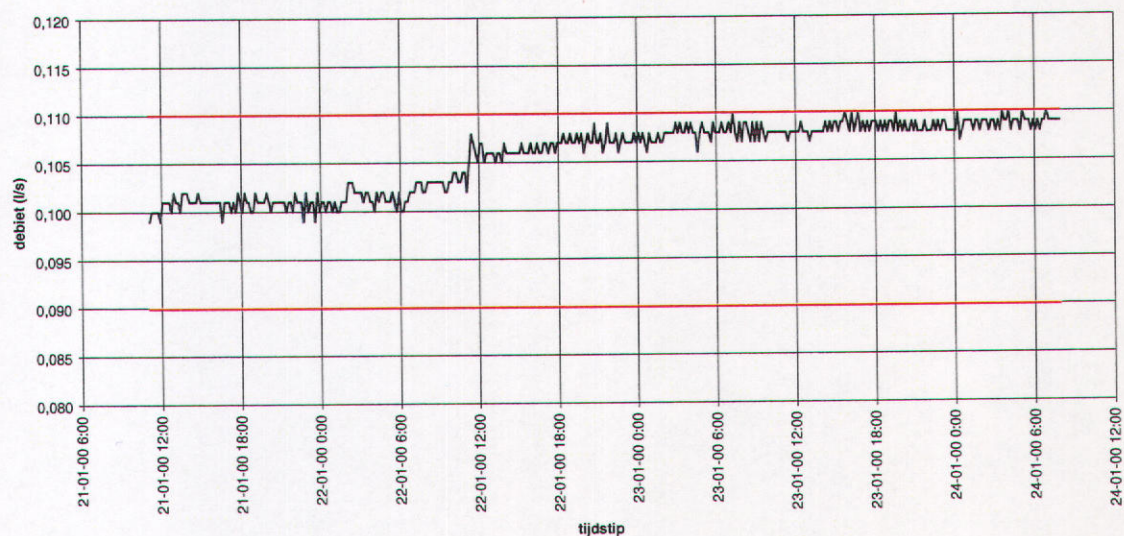
C.w.

343 343

3

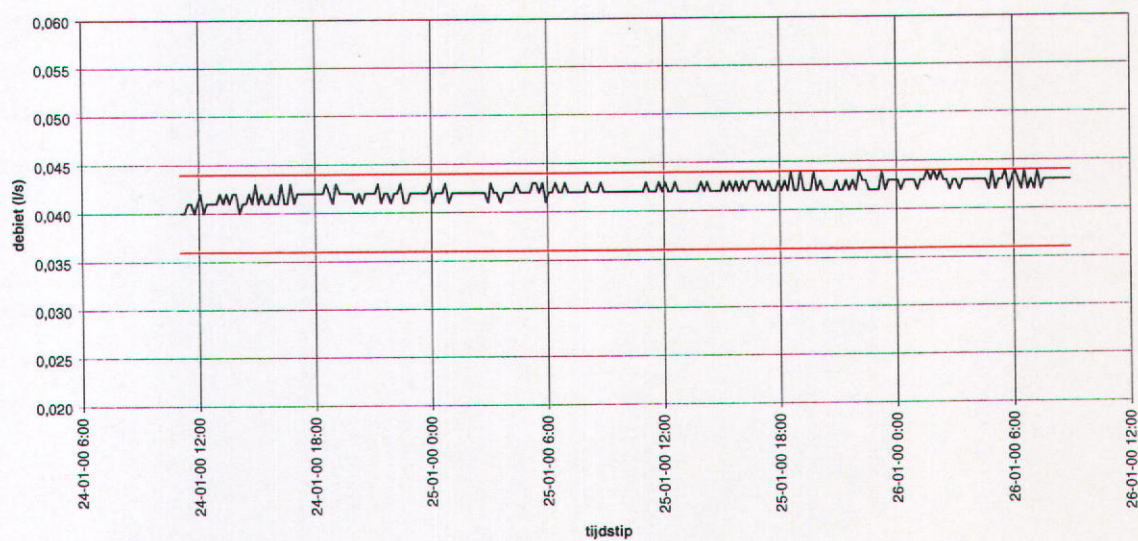
4a

debietmeting experiment 1 (30° - 0,10 l/s)



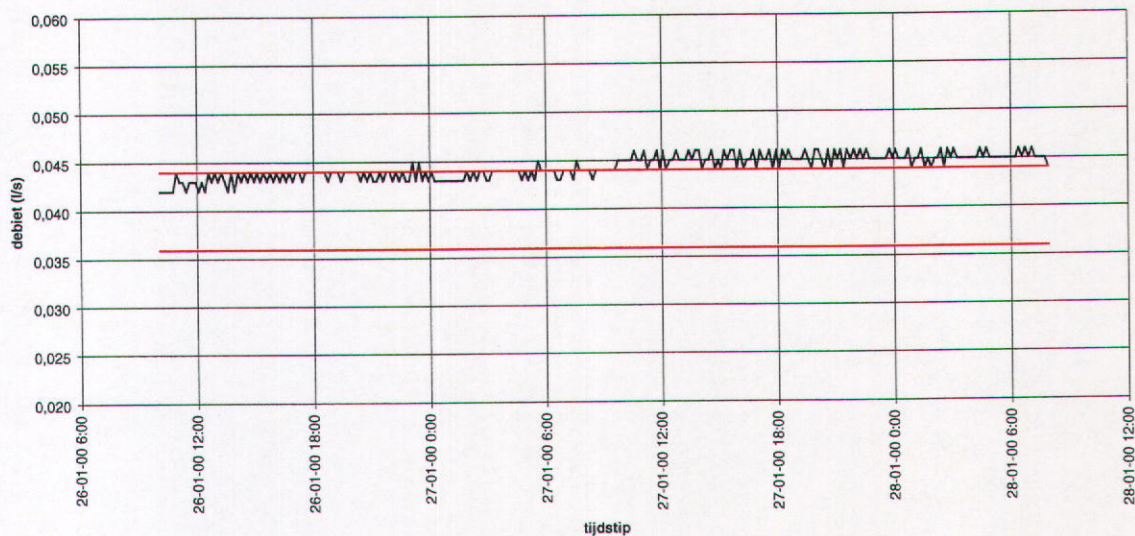
4b

debietmeting experiment 2 (30° - 0,04 l/s)



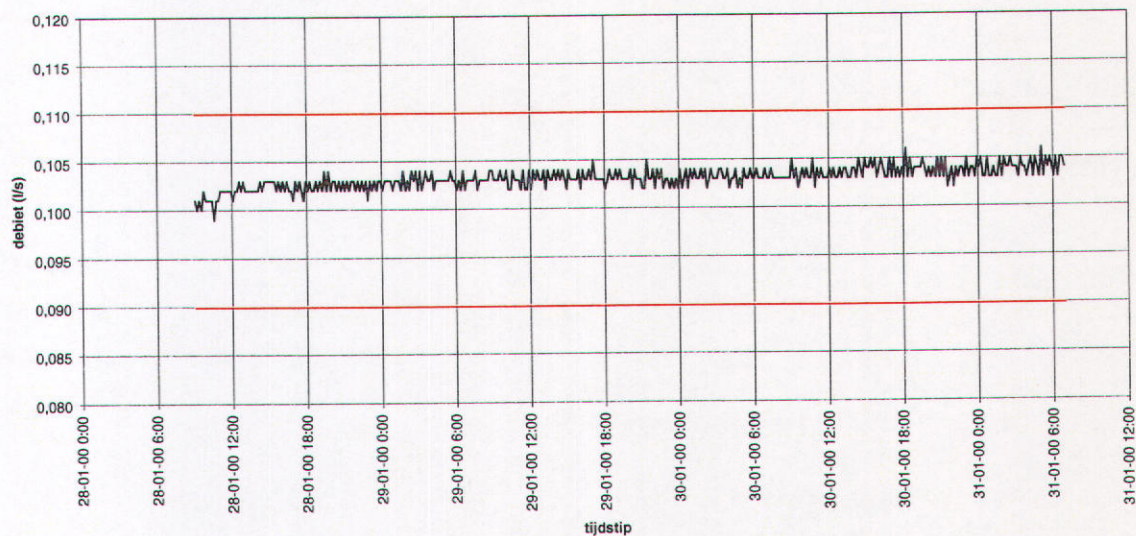
4c

debietmeting experiment 3 (25° - 0,04 l/s)



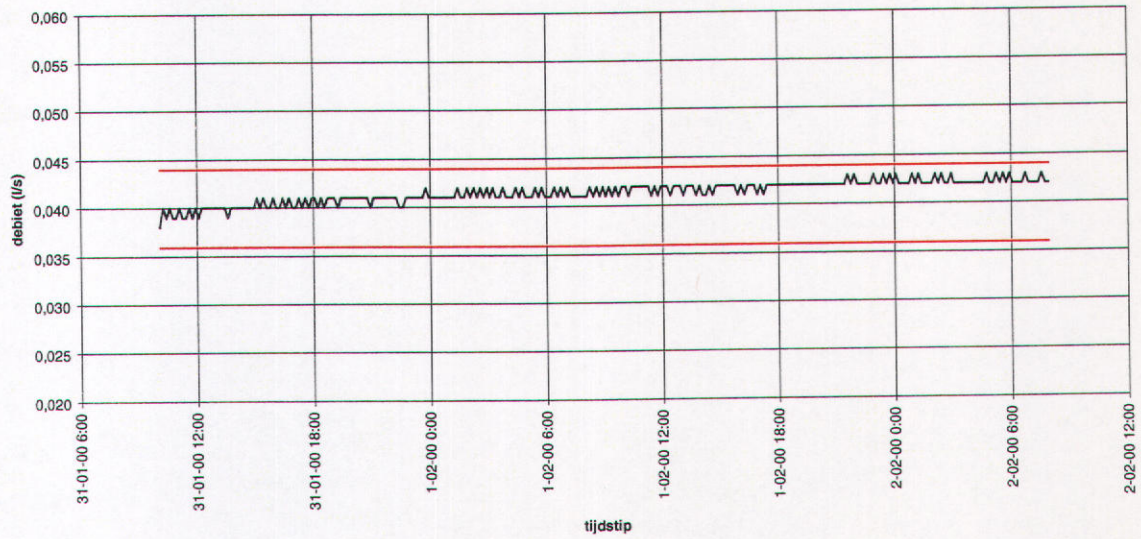
4d

debietmeting experiment 4 (25° - 0,10 l/s)



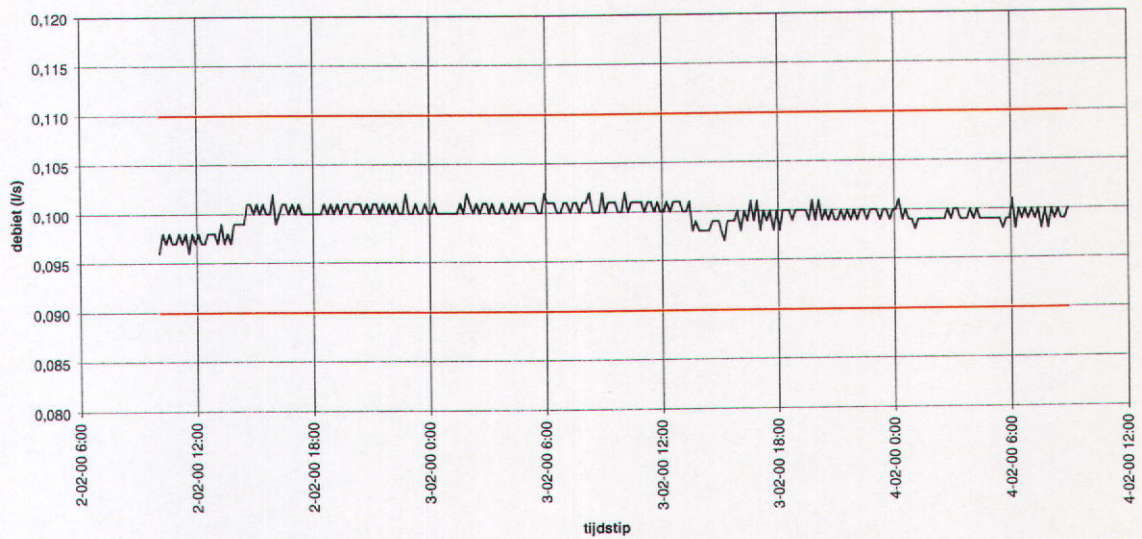
4e

debietmeting experiment 5 (35° - 0,04 l/s)



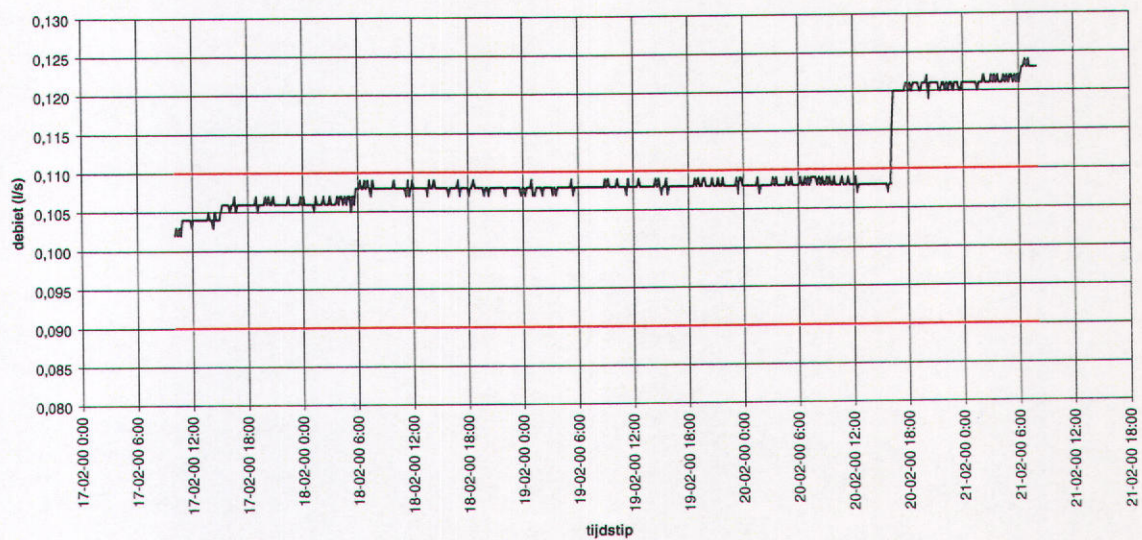
4f

debietmeting experiment 6 (35° - 0,10 l/s)



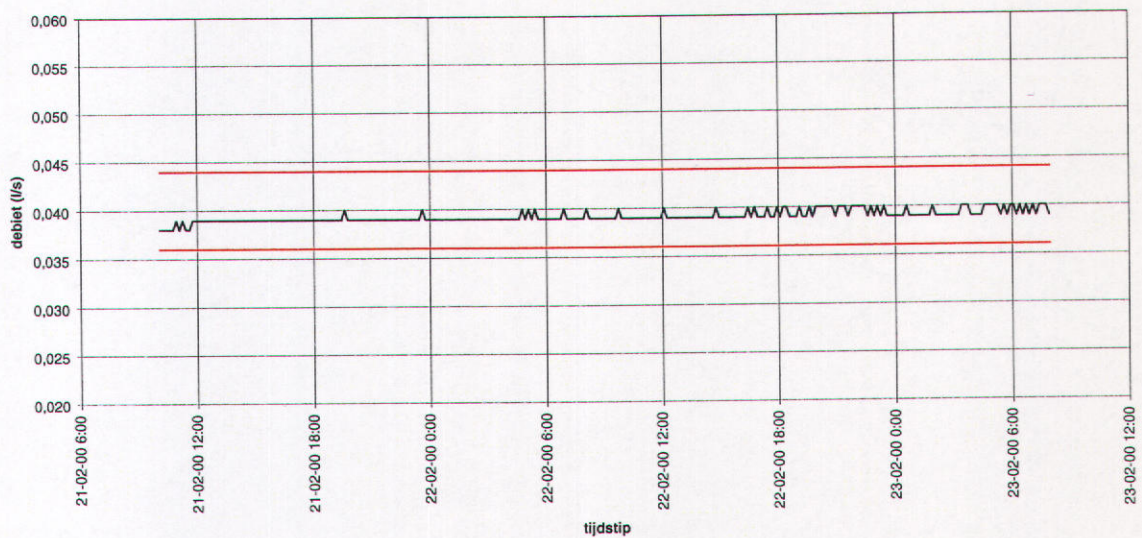
4g

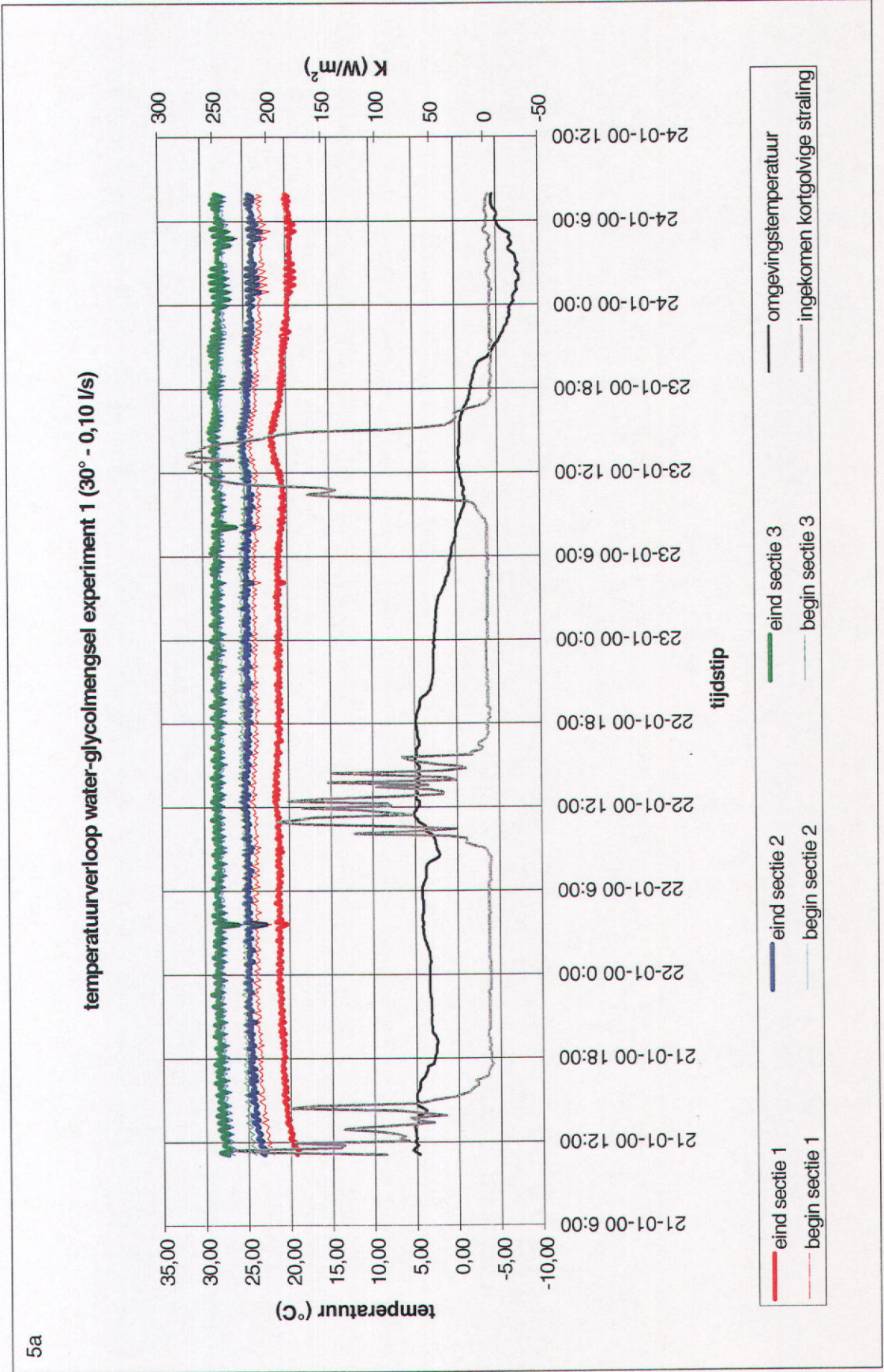
debietmeting experiment 7 (40° - 0,10 l/s)



4h

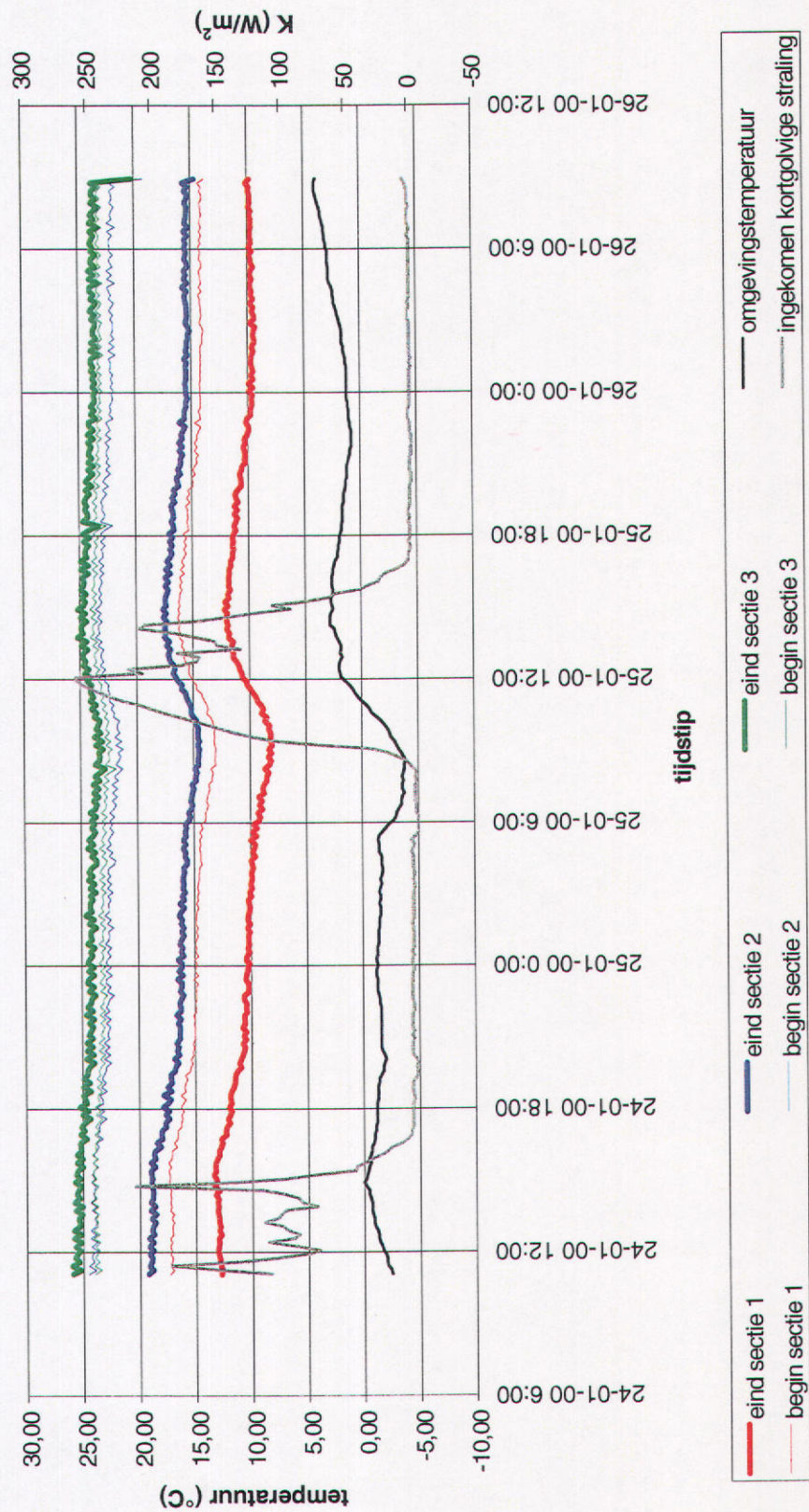
debietmeting experiment 8 (40° - 0,04 l/s)





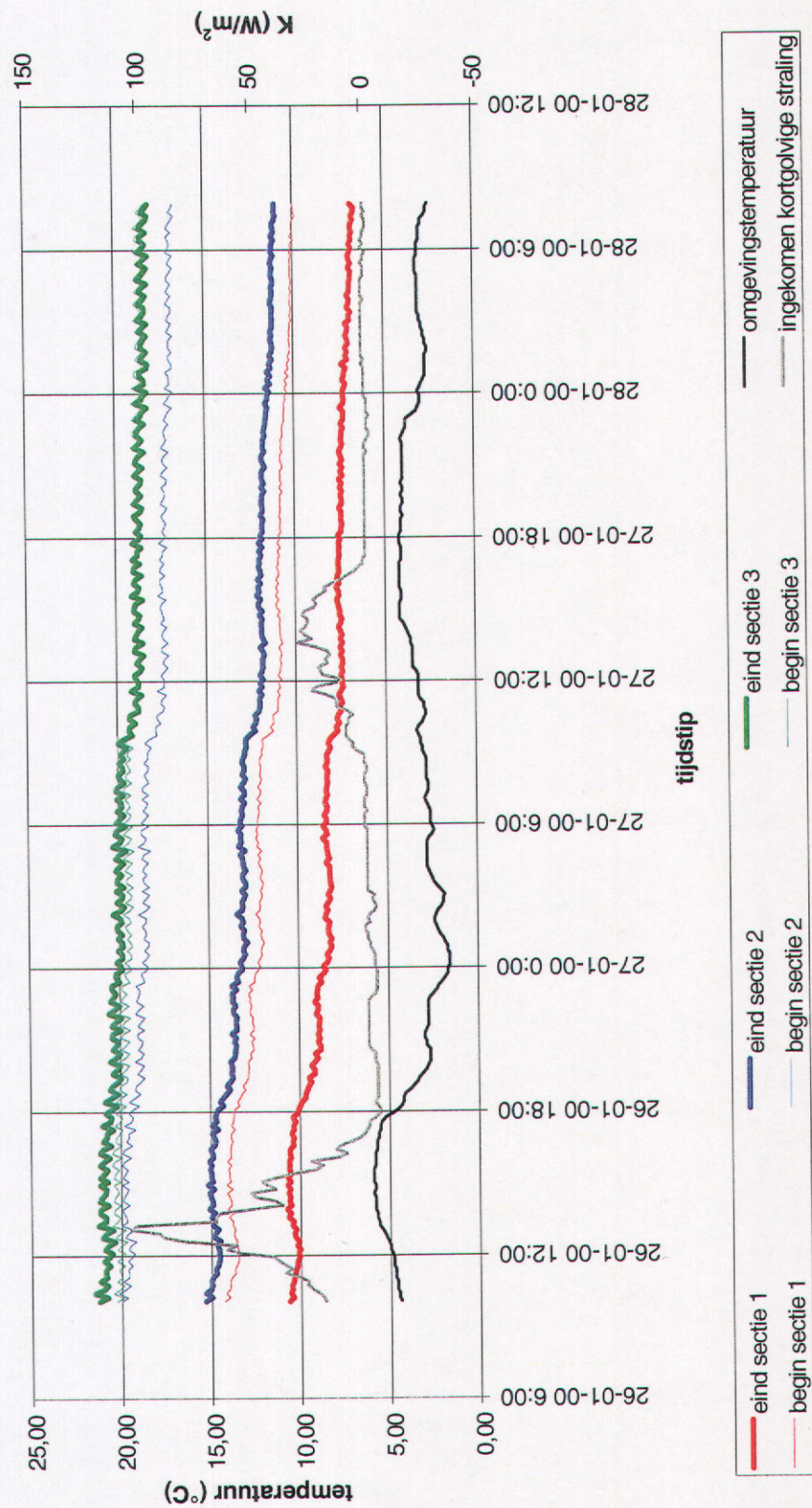
5b

temperatuurverloop water-glycolmengsel experiment 2 (30° - 0,04 l/s)



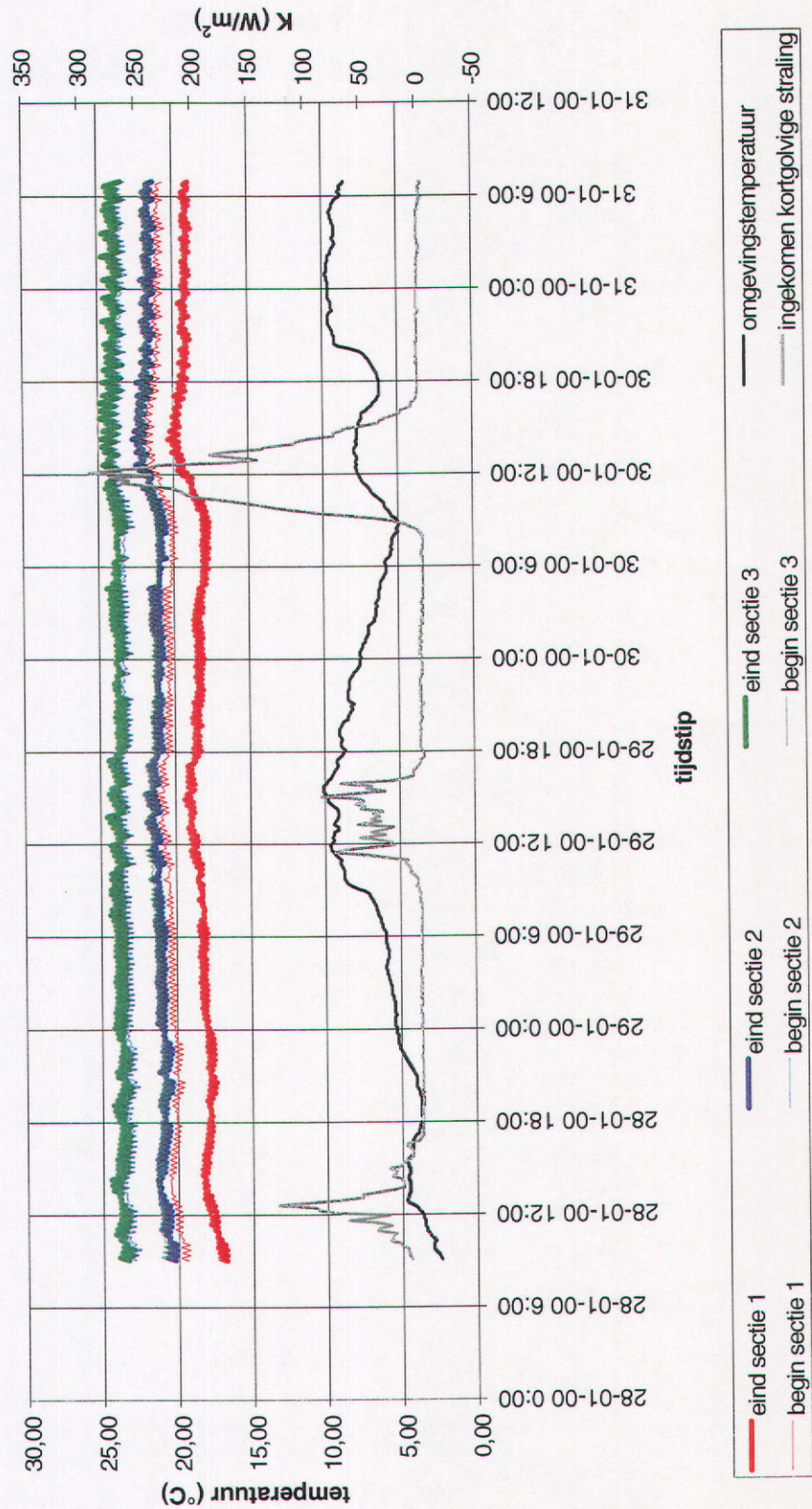
5c

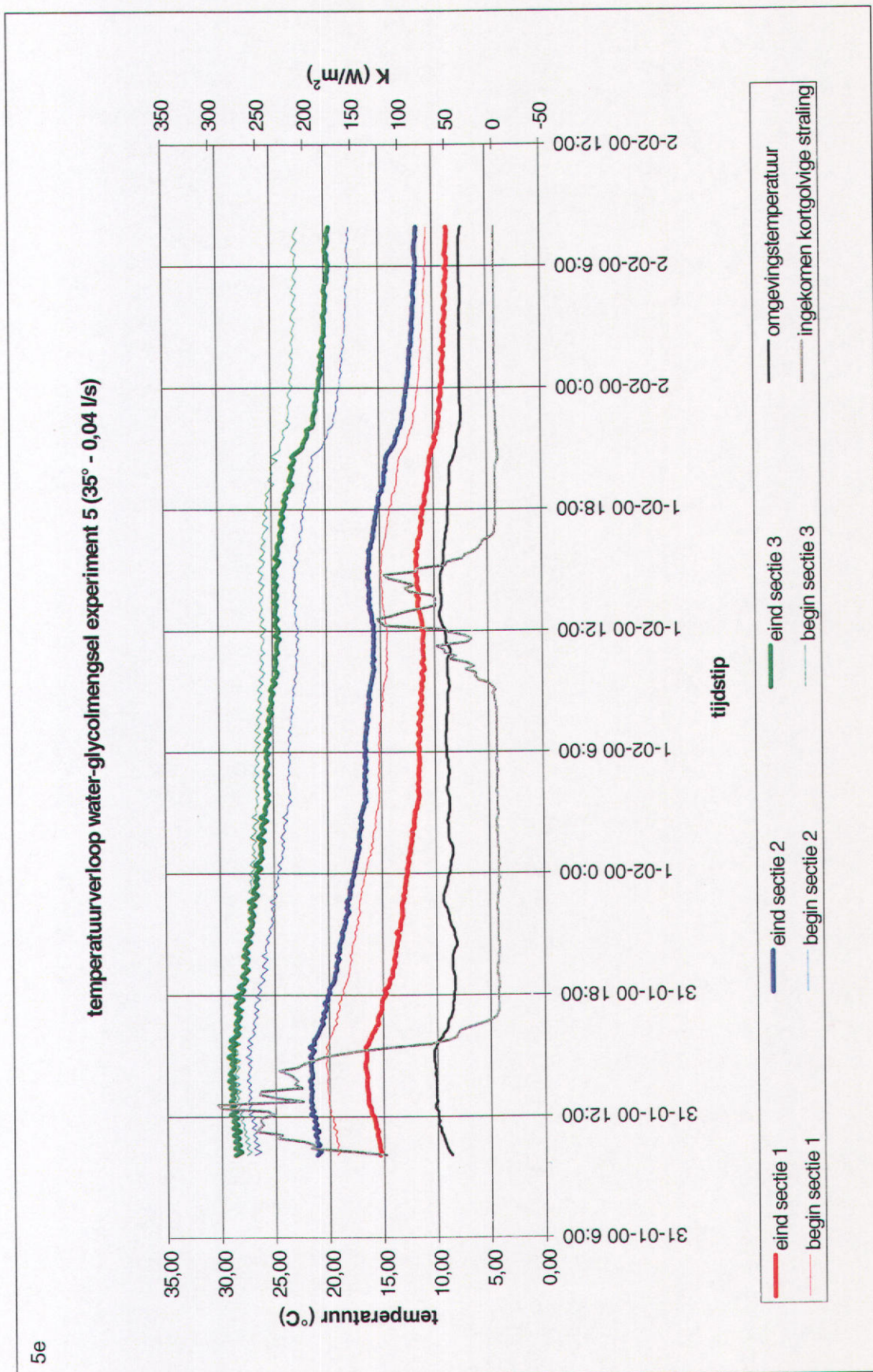
temperatuurverloop water-glycolmengsel experiment 3 (25° - 0,04 l/s)



5d

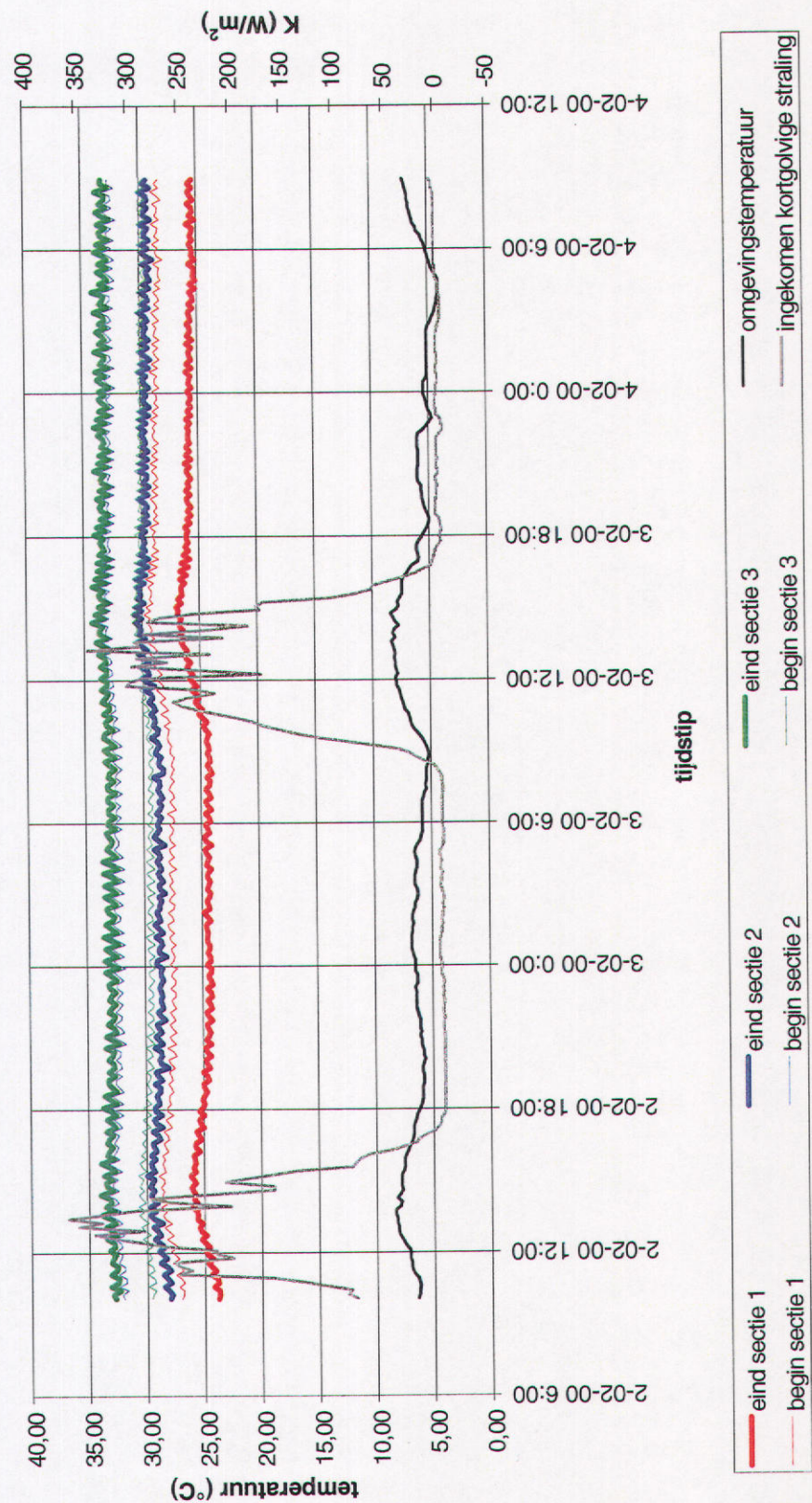
temperatuurverloop water-glycolmengsel experiment 4 (25° - 0,10 l/s)





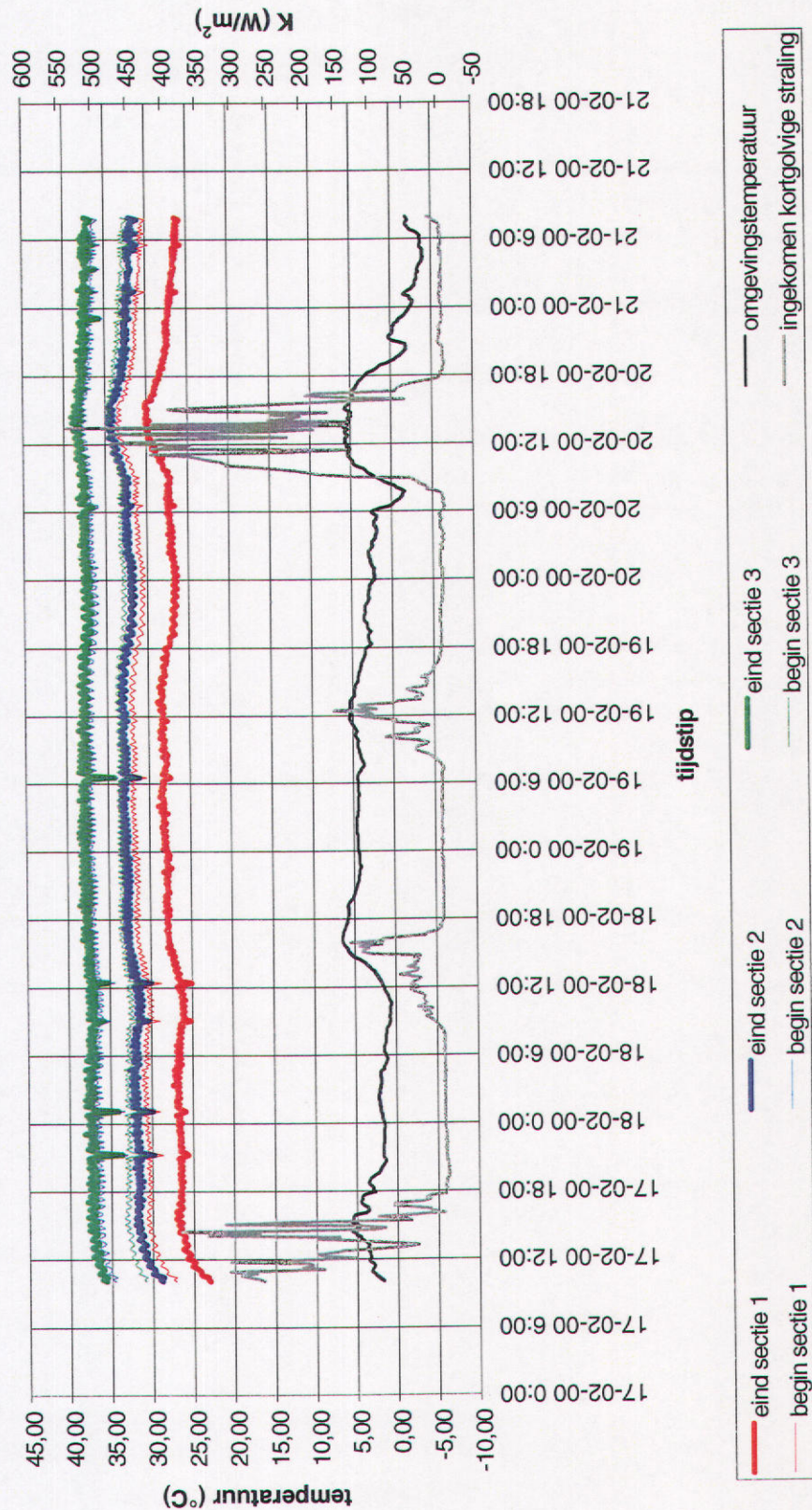
5f

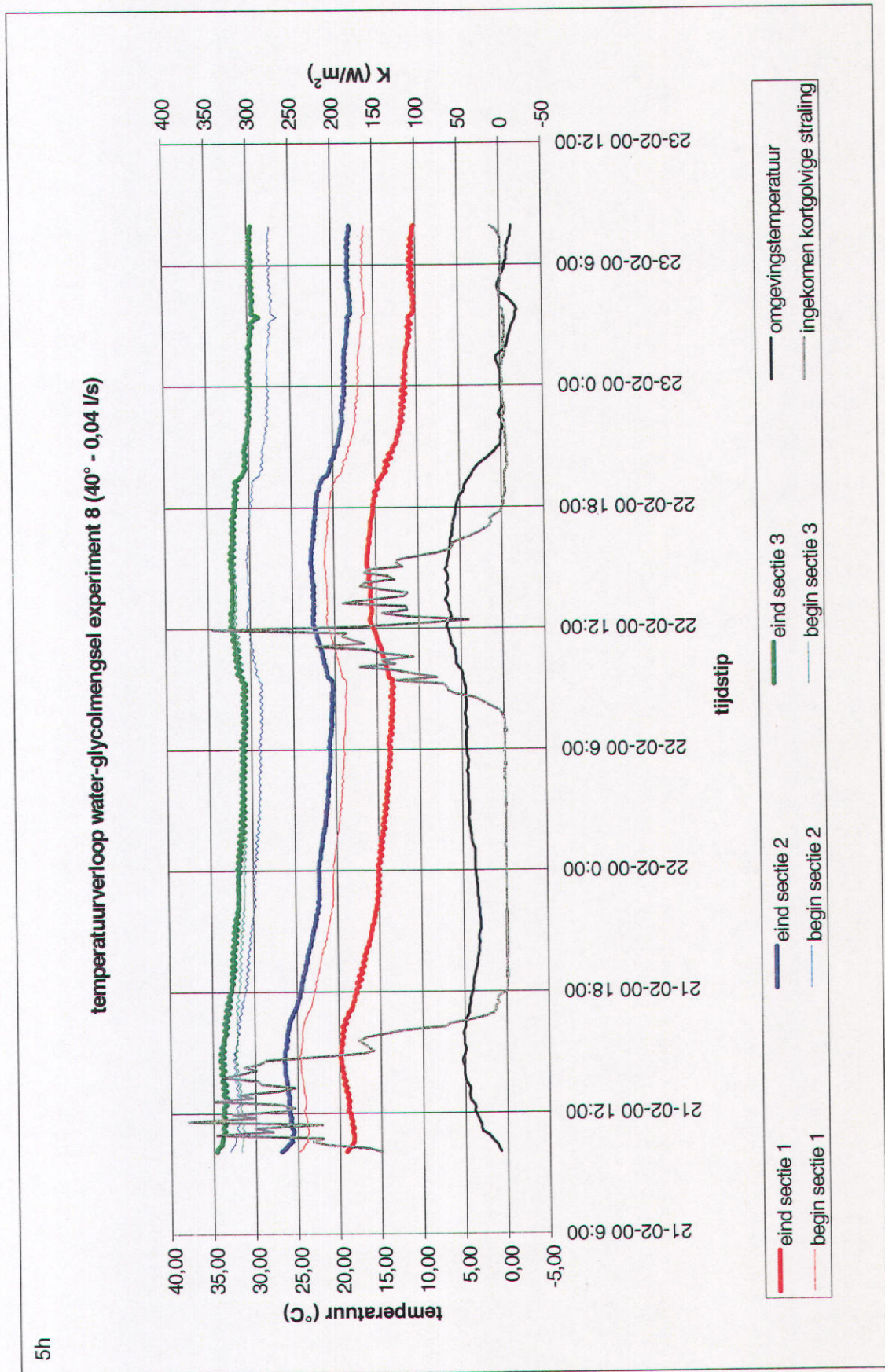
temperatuurverloop water-glycolmengsel experiment 6 (35° - 0,10 l/s)



5g

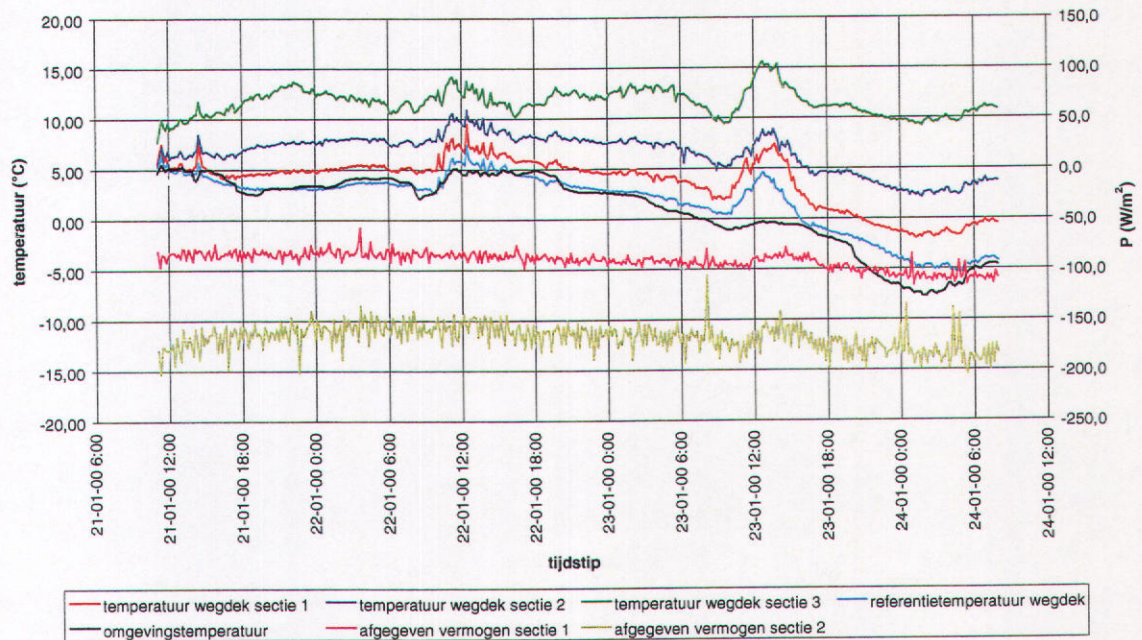
temperatuurverloop water-glycolmengsel experiment 7 (40° - 0,10 l/s)





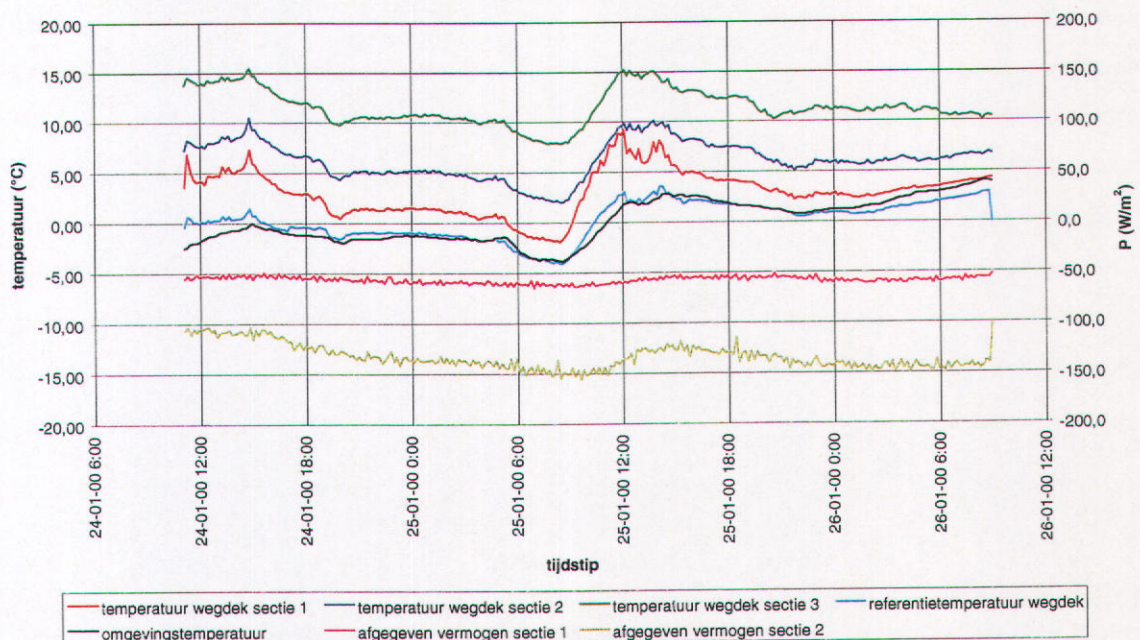
6a

temperatuurverloop wegdekoppervlak tussen de leidingen experiment 1 (30° - 0,10 l/s)



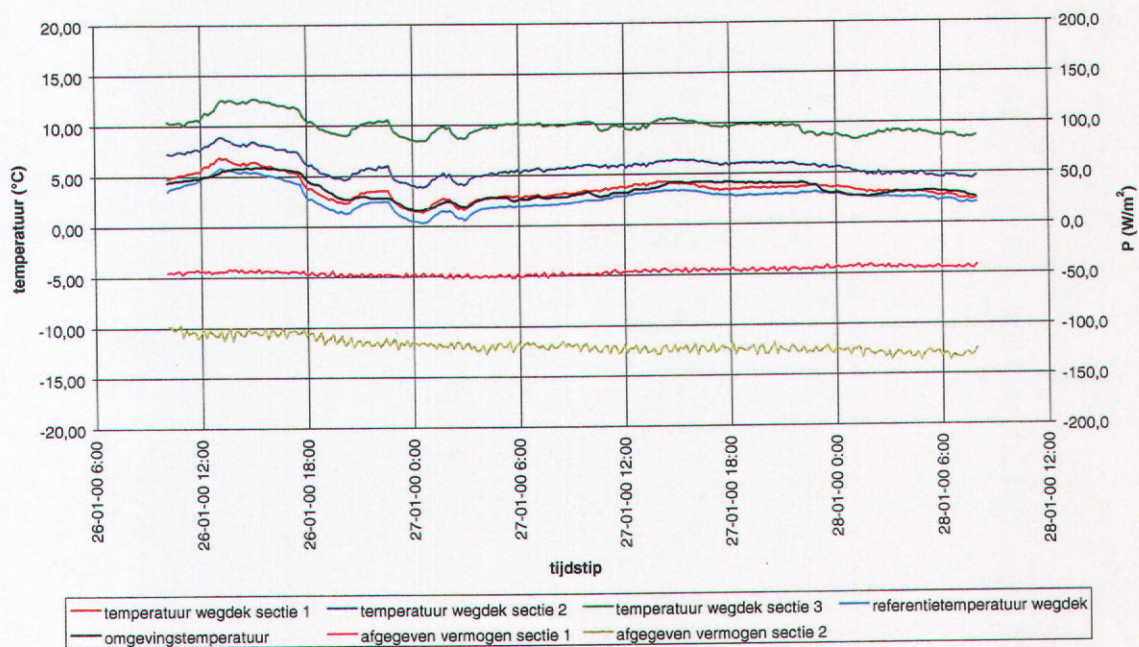
6b

temperatuurverloop wegdekoppervlak tussen de leiding experiment 2 (30° - 0,04 l/s)



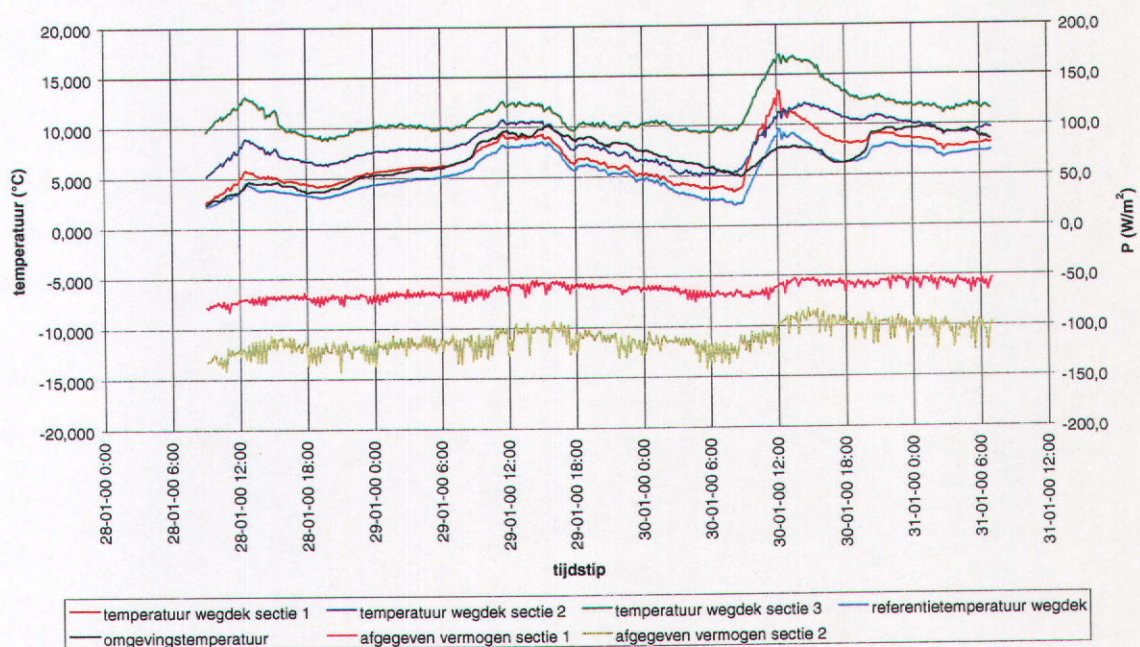
6c

temperatuurverloop wegdekoppervlak tussen de leidingen experiment 3 (25° - 0,04 l/s)



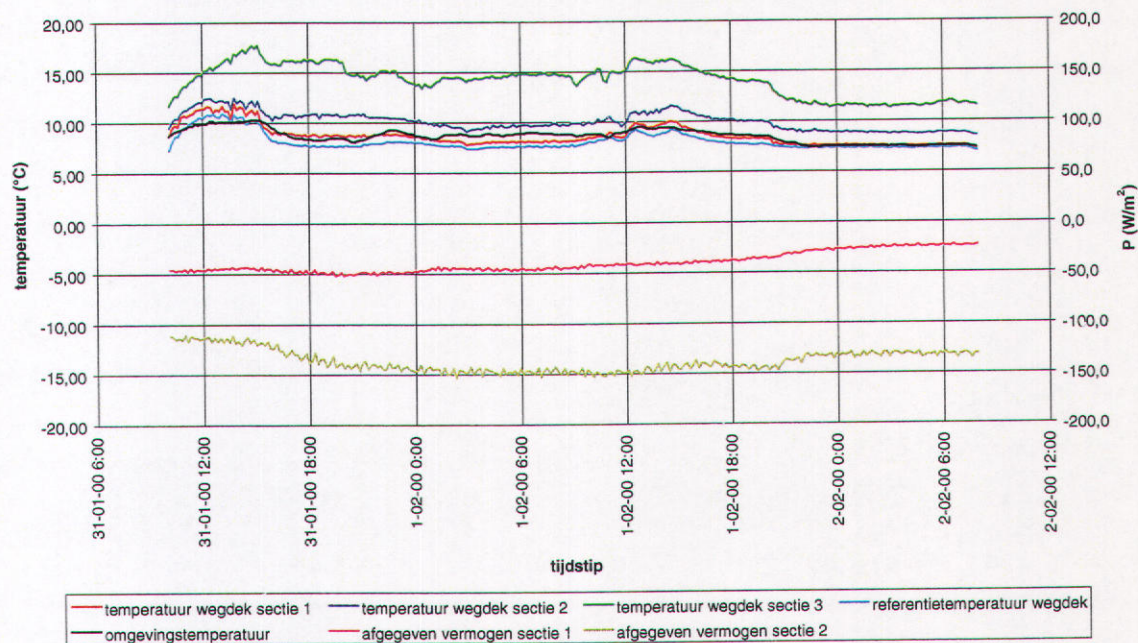
6d

temperatuurverloop wegdekoppervlak tussen de leidingen experiment 4 (25° - 0,10 l/s)



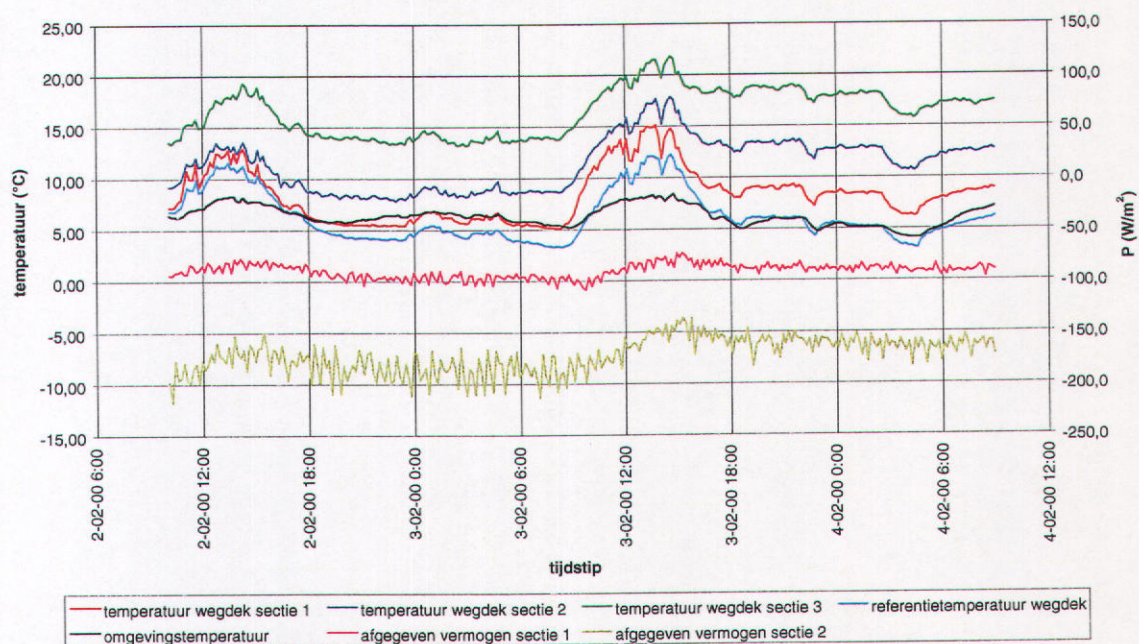
6e

temperatuurverloop wegdekoppervlak tussen de leidingen experiment 5 (35° - 0,04 l/s)



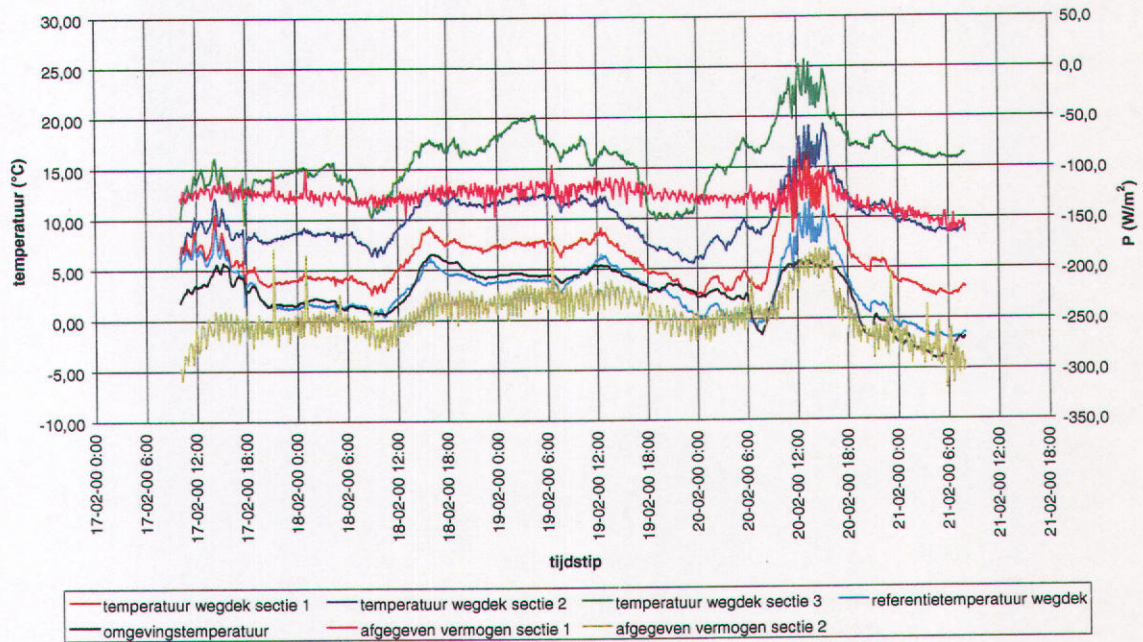
6f

temperatuurverloop wegdekoppervlak tussen de leidingen experiment 6 (35° - 0,10 l/s)



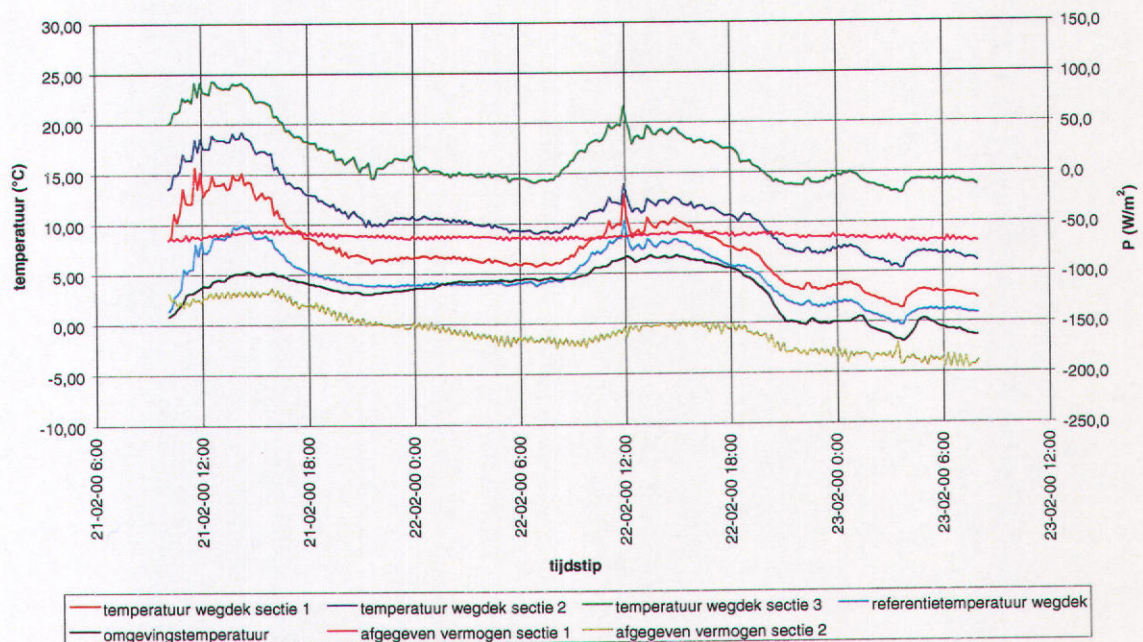
6g

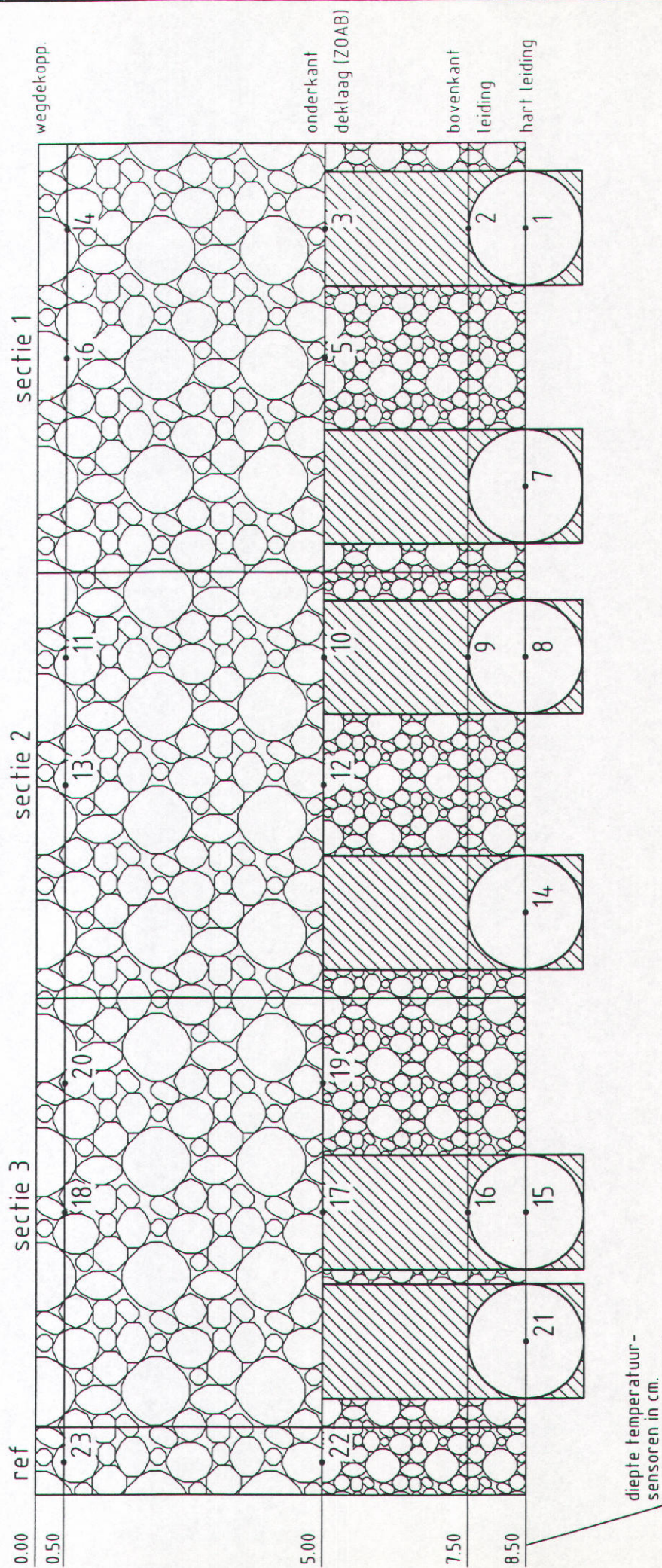
temperatuurverloop wegdekoppervlak tussen de leidingen experiment 7 (40° - 0,10 l/s)



6h

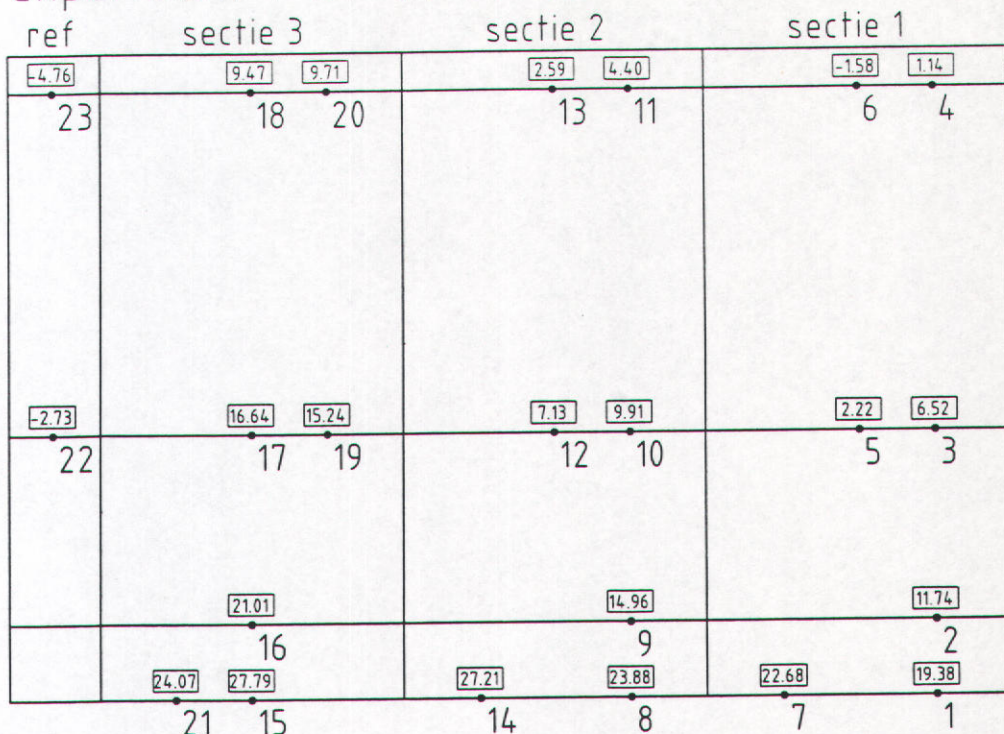
temperatuurverloop wegdekoppervlak tussen de leidingen experiment 8 (40° - 0,04 l/s)



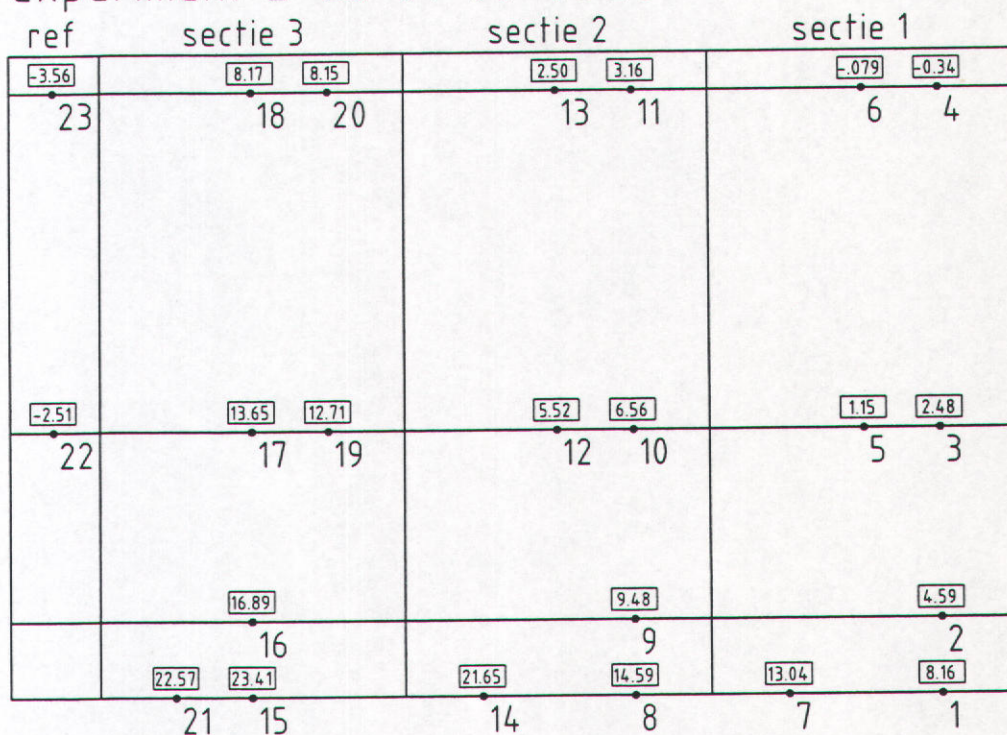


Grontmij Advies & Techniek bv Vestiging Drenthe Stationsplein 12 Postbus 29 9400 AA Assen Telefoon (0592) 33 88 99 Telefax (0592) 33 06 67		Grontmij Project SPINOZA-WARMTEWISSELAAR Opdrachtgever RIJKSWATERSTAAT dienst weg- en waterbouwkunde	
Onderdeel dwarsdoorsnede warmtewisselaar		Besteknummer A4	
Wijziging Datum 10-07-00		Tekeningnummer 01000600	
Get. Contr. Akk. Projectnr. 0192111		Get. Contr. Akk. C.w. 100	
Grontmij Groep Alle rechten voorbehouden		Bijlage in bladen, blad 7 5 1	

experiment 1 24-01-00 02:20



experiment 2 25-01-00 08:50



Project **SPINOZA-WARMTEWISSELAAR**

Opdrachtgever **RIJKSWATERSTAAT**
dienst weg- en waterbouwkunde

Onderdeel **temperatuurverdeling bij laagste omgevingstemperatuur**

Wijziging	Datum	Get.	Contr.	Akk.	Projectnr.	Tekeningnummer	Datum	Get.	Contr.	Akk.	Bijlage	in bladen	blad
					0192111	01000601	10-07-00	C.w.			7	5	2

Grontmij
Advies & Techniek bv
Vestiging Drenthe
Stationsplein 12
Postbus 29
9400 AA Assen
Telefoon (0592) 33 88 99
Telefax (0592) 33 06 67

Besteknummer

Schaal **n.v.t.**
Formaat **A4**

experiment 3 27-01-00 00:30

ref	sectie 3	sectie 2	sectie 1
0.42	8.40 8.50	3.95 4.51	1.52 2.02
23	18 20	13 11	6 4
1.47	12.77 12.06	6.49 7.26	3.34 4.25
22	17 19	12 10	5 3
15.16		9.44	5.75
	16	9	2
19.46 19.95		18.51 13.12	12.14 8.37
	21 15	14 8	7 1

experiment 4 28-01-00 18:30

ref	sectie 3	sectie 2	sectie 1
3.21	9.08 9.17	6.53 7.30	4.30 5.65
23	18 20	13 11	6 4
3.39	14.67 13.65	8.80 10.86	5.69 8.64
22	17 19	12 10	5 3
18.18		14.45	12.21
	16	9	2
21.04 23.80		23.32 20.88	20.07 17.79
	21 15	14 8	7 1



Project

SPINOZA-WARMTEWISSELAAR

Opdrachtgever

RIJKSWATERSTAAT
dienst weg- en waterbouwkunde

Grontmij
Advies & Techniek bv
Vestiging Drenthe
Stationsplein 12
Postbus 29
9400 AA Assen
Telefoon (0592) 33 88 99
Telefax (0592) 33 86 67

Onderdeel

temperatuurverdeling bij laagste omgevingstemperatuur

Schaal

n.v.t.

Formaat

A4

Besteknummer

Wijziging

Datum

Get.

Contr.

Akk.

Projectnr.

Tekeningnummer

Datum

Get.

Contr.

Akk.

Bijlage in bladen, blad

0192111 01000602 10-07-00 C.w. 7 5 3

experiment 5 02-02-00 00:20

ref	sectie 3	sectie 2	sectie 1
7.37 23	11.49 18 11.57 20	8.91 13 8.93 11	7.62 6 7.73 4
7.39 22	14.89 17 14.33 19	9.85 12 9.99 10	8.17 5 8.25 3
	16.88 16	10.85 9	8.51 2
	23.12 21 20.50 15	18.57 14 12.35 8	11.33 7 9.19 1

experiment 6 04-02-00 04:40

ref	sectie 3	sectie 2	sectie 1
3.64 23	16.26 18 16.21 20	11.11 13 12.59 11	6.73 6 9.13 4
4.59 22	22.78 17 21.70 19	14.82 12 17.16 10	9.49 5 13.46 3
	26.82 16	21.70 9	18.15 2
	29.82 21 33.33 15	32.71 14 29.40 8	28.42 7 25.39 1



Project SPINOZA-WARMTEWISSELAAR

Opdrachtgever RIJKSWATERSTAAT
dienst weg- en waterbouwkunde

Grontmij
Advies & Techniek bv
Vestiging Drenthe
Stationsplein 12
Postbus 29
9400 AA Assen
Telefoon (0592) 33 88 99
Telefax (0592) 33 06 67

Onderdeel	temperatuurverdeling bij laagste omgevingstemperatuur	Schaal	n.v.t.	Formaat	A4	Besteknummer	
Wijziging	Datum	Get.	Contr.	Akk.	Projectnr.	Tekeningnummer	Datum
					0192111	01000603	10-07-00
					C.w.	343	343
							7 5 4

experiment 7 21-02-00 04:30

ref	sectie 3	sectie 2	sectie 1
23 -1.76	18 15.83 20 15.92	13 8.60 11 10.53	6 2.43 4 5.74
22 0.12	17 24.15 19 22.65	12 13.66 10 16.57	5 6.70 3 11.61
	16 29.37 32.91 37.34	9 22.84 36.57 32.17	2 17.55 30.72 26.58
	21 15	14 8	7 1

experiment 8 23-02-00 03:50

ref	sectie 3	sectie 2	sectie 1
23 0.18	18 13.20 20 13.44	13 5.95 11 6.73	6 2.00 4 2.76
22 1.55	17 19.10 19 17.96	12 9.09 10 10.04	5 4.40 3 5.40
	16 22.71 29.57 29.40	9 13.16 27.12 17.89	2 7.19 16.15 10.42
	21 15	14 8	7 1



Grontmij

Project

SPINOZA-WARMTEWISSELAAR

Opdrachtgever

RIJKSWATERSTAAT
dienst weg- en waterbouwkunde

Grontmij

Advies & Techniek bv
Vestiging Drenthe
Stationsplein 12
Postbus 29
9400 AA Assen
Telefoon (0592) 33 88 99
Telefax (0592) 33 06 67

Onderdeel

temperatuurverdeling bij laagste omgevingstemperatuur

Schaal

n.v.t.

Formaat

A4

Besteknummer

Wijziging

Datum

Get.

Contr.

Akk.

Projectnr.

Tekeningnummer

Datum

Get.

Contr.

Akk.

Bijlage in bladen, blad

0192111 01000630 10-07-00 C.w. 343 343 7 5 5

