

F100

DEEL 2

DWARSVERBINDINGEN MET GRONDBEVRIEZING
FROSTHEAVE ONDERZOEK IN NEDERLANDSE GROND

COB

VOORWOORD

Kunstmatige grondbevriezing staat sinds de toepassing voor de aanleg van de dwarsverbindingen van de Westerscheldetunnel sterk in de belangstelling. De techniek is een tijdelijke en milieuvriendelijke manier van grondverbetering en wordt in het buitenland als meer dan 40 jaar toegepast. De aanleg van de dwarsverbindingen van de Westerscheldetunnel bood een unieke kans om de ontwikkeling van de temperatuur en de deformatie van de grond en tunnel – die zich voordoen bij grondbevriezing – alsmede het werkproces te volgen en te bepalen.

Voorliggende rapportage vormt het tweede deel van het eindrapport van het COB praktijkonderzoek F100 bij de Westerscheldetunnel. Het rapport bevat de weergave van de resultaten van de werkzaamheden van een deel van het Delft Cluster project ‘Grondbevriezing en Civiele Werken’. Deze werkzaamheden zijn onder begeleiding van de uitvoeringscommissie F100 tot stand gekomen.

In het rapport wordt aandacht besteed aan de resultaten van de laboratoriumproeven die zijn uitgevoerd op monsters van 4 verschillende Nederlandse grondsoorten. Daarnaast bevat het rapport de beschrijving van de werkzaamheden die hebben geleid tot een aangepast 3D rekenmodel GeoFreeze 2.0. Dit model is beschikbaar in DIANA.

Het F100-onderzoek is gefinancierd door het Gemeenschappelijk Platform Praktijkonderzoek Boortunnels. Het GPB bestaat uit projectorganisaties van de Betuweroute, de HSL, de Noord/Zuidlijn en COB (Delft Cluster, RWS en projectparticipanten).

SAMENSTELLING UITVOERINGSKOMMISSIE F100

Ir. Evert Worm	Rijkswaterstaat/Bouwdienst	Rijkswaterstaat	–
	<i>voorzitter</i>		
Ir. Bas Hemmen	Delft Cluster/GeoDelft	– <i>secretaris</i>	
Ir. Harry Dekker	COB	– <i>coördinator</i>	
Ir. Marius Naaktgeboren	Rijkswaterstaat/Bouwdienst/HSL-Zuid		
Drs. Richard Rijkers	Delft Cluster/TNO-NITG		
Ir. Peter Roelands	Railinfrabeheer/Managementgroep Betuweroute		
Ir. Ron van Beek	Rijkswaterstaat/Noordzuidlijn/W+B		
Ir. Hein Jansen	TEC/Fugro		
Ir. Paul Litjens	COB	– <i>coördinator</i>	
Ing. Johan de Boer	TBO Holding		
Stefan Danieli	Tubecon		
Jan van der Graaf	ITM		
Ir. J. Jansen	Arcadis		
Peter Langhorst	HBG Civiel Grondtechniek		
Ir. Dirk Luger	Delft Cluster/GeoDelft		
Ing. Ab Proper	Tubecon		
Ing. R. Rozing	Holland Railconsult		
Rob Schippers	BTC		
Ir. M.A.T. Visschedijk	GeoDelft		
Dr. G. Greeuw	GeoDelft		

Voorliggend rapport geeft een schat aan informatie over de toegepaste vriestechniek bij het realiseren van de dwarsverbindingen van de Westerscheldetunnel. Met dank aan de aannemerscombinatie KMW, die haar meetgegevens beschikbaar stelde en de opdrachtnemers TNO en GeoDelft, die het leeuwendeel van het uitvoerende werk verrichten.

INHOUDSOPGAVE

VOORWOORD	1
1. INLEIDING	10
2. METHODEN	11
2.1. INLEIDING	11
2.2. FROSTHEAVE PROEVEN	12
2.3. CLASSIFICATIE VAN GRONDSOORTEN	13
2.4. KEUZE VAN DE GRONDSOORTEN	14
3. PROEFRESULTATEN	15
3.1. INLEIDING	15
3.2. RESULTATEN WESTERSCHELDE ZAND (Z1)	15
3.3. RESULTATEN BOOMSE KLEI (BK2)	17
3.3.1. proef bk2-2	19
3.3.2. proef bk2-3	19
3.3.3. proef bk2-4	19
3.3.4. proef bk2-5	19
3.3.5. proef bk2-6	20
3.3.6. proef bk2-7	20
3.3.7. proef bk2-8	20
3.4. RESULTATEN ZUIDPOLDER KLEI	21
3.4.1. proeven zpk-1 t/m zpk-3	22
3.4.2. proeven zpk-4 t/m zpk-6	23
3.5. HOLLANDVEEN	23
3.5.1. proeven HV-1 t/m HV-3	25
3.5.2. proeven HV-4 t/m HV-8	25

4.	INTERPRETATIE	26
4.1.	INLEIDING	26
4.2.	WESTERSCHELDE ZAND	27
4.3.	BOOMSE KLEI	28
4.4.	ZUIDPOLDER KLEI	29
4.5.	HOLLANDVEEN	30
4.6.	IJSLENSVORMING	32
5.	RELATIE GRONDSOORT EN VORSTHEFFING	34
5.1.	VORSTGEVOELIGHEID	34
5.1.1.	classificatie	34
5.1.2.	ijslensvorming en grondspanningen	35
5.2.	DE RELATIE INDEXPARAMETERS EN VORSTGEVOELIGHEID	35
5.3.	VORSTHEFFING, VORSTGEVOELIGHEID EN VRIESSPANNINGEN	37
5.4.	ANALYSE VAN EXPERIMENTELE RESULTATEN	38
5.4.1.	laagpakket van boom	39
5.4.2.	zuidpolderklei	39
5.4.3.	Hollandveen	39
5.4.4.	westerschelde zand	41
5.5.	CONCLUSIES	41
6.	MODELLERING GRONDVRIEZEN	42
6.1.	INLEIDING	42
6.1.1.	mogelijkheden en beperkingen	42
6.1.2.	materiaalparameters	42
6.2.	EXPERIMENTELE RESULTATEN	42
6.3.	THEORIE	46
6.3.1.	tijdsafhankelijke temperatuursverdeling	46
6.3.2.	tijdsafhankelijke spanningen, stroming en vervorming	47
6.4.	SIMULATIES	50
6.4.1.	elementennet en randvoorwaarden	50

6.4.2. invoer en resultaten zand z1-1	51
6.4.3. klei bk2-4	56
6.5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN MODELLERING	59
7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	60
7.1. CONCLUSIES	60
7.2. AANBEVELINGEN	61
8. REFERENTIES	62

FIGUREN

Figuur 1	schema van de gebruikte frostheave opstelling	12
Figuur 2	foto van de frostheave cel	13
Figuur 3	korrelverdelingen van de grondsoorten uit boringen HE-04 en SM-02 bij de Westerscheldetunnel (Terneuzen)	15
figuur 4	Boorbeschrijving HE-04 met aangegeven de posities van de 8 proefmonsters van de Boomse klei	18
figuur 5	schema proeven Zuidpolderklei tegen diepte (m-MV)	21
figuur 6	Beschrijving boring nr. 28 te Bergambacht	24
figuur 7	Regressielijnen ter bepaling van de water inname snelheid	27
figuur 8	SP waarden van Boomse klei BK2 als functie van de bovenbelasting	28
figuur 9	SP waarden Zuidpolderklei tegen belasting	30
figuur 10	SP waarden tegen kleifractie	30
figuur 11	Hollandveen: SP als functie van de verticale belasting	31
figuur 12	Ijslenzen in Boomse klei (BK2-4)	33
figuur 13	Ijslens en scheuren in Zuidpolderklei (ZPK-1)	33
figuur 14	relatie vorstheffing SP – axiale druk: alle grondsoorten	39
figuur 15	Hollandveen: relatie SP – axiale druk	40
figuur 16	Hollandveen: relatie SP – watergehalte	40
figuur 17	Hollandveen: relatie SP – korrenfractie <2 μ m	40
figuur 18	Z1-1: gemeten temperatuur, van onder (M000) tot boven (M140)	44
figuur 19	BK2-4: gemeten temperatuur, van onder (M000) t42 boven (M140)	44
figuur 20	Z1-1 en BK2-4: gemeten verlenging en waterinname	45
figuur 21	Geleiding en enthalpie als functie van temperatuur	46
figuur 22	Relatief volume water en ijs als functie van temperatuur	47
figuur 23	Ijslensvorming in overgangszone tussen bevroren en onbevroren grond	48
figuur 24	Randcondities voor berekening van temperatuur en vervorming	50
figuur 25	Elementennet voor de temperatuursverdeling, met grond en perspex	51
figuur 26	Z1-1 en BK2-4 – aangenomen relatief volume versus temperatuur	52
figuur 27	Z1-1: temperatuursverdeling 9000 seconden na start vriezen	53
figuur 28	Z1-1: temperatuursverdeling gedurende stationair vriezen	54
figuur 29	Z1-1: Voorspelde temperatuursontwikkeling ter plaatse opnemers	54
figuur 30	Z1-1: vergelijking voorspelde en gemeten temperaturen (start vriezen)	55
figuur 31	Z1-1: vergelijking voorspelde en gemeten temperaturen (einde vriezen)	55
figuur 32	Z1-1: vergelijking voorspelde en gemeten verplaatsing en aanzuiging	56
figuur 33	BK2-4: voorspelde temperatuursontwikkeling ter plaatse opnemers	57
figuur 34	BK2-4: vergelijking voorspelde en gemeten temperaturen, P = voorspeld, M = gemeten	58
figuur 35	BK2-4: vergelijking voorspelde en gemeten verplaatsing en aanzuiging	58

TABELLEN

tabel 1	proefgegevens Westerschelde zand bij inbouw	16
tabel 2	korrelfracties van de Boomse klei	17
tabel 3	gegevens van de BK2 proefmonsters	17
tabel 4	classificatie gegevens van de Zuidpolder klei	22
tabel 5	gegevens van de ZPK frostheave proefmonsters	22
tabel 6	classificatie van de Hollandveen monsters	24
tabel 7	vriesproefgegevens Hollandveen	24
tabel 8	resultaten proeven op veen bij -20 °C	25
tabel 9	Berekende SP waarden voor de Boomse klei	28
tabel 10	overzicht SP waarden per proef	29
tabel 11	SP waarden bepaald voor de veenproeven	31
tabel 12	gegevens over de ijslensvorming bij de proeven op Boomse en Zuidpolder klei	32
tabel 13	vorstgevoeligheid van verschillende grondsoorten (naar ISSMFE, 1989)	34
tabel 14	geotechnische eigenschappen van de proefmonsters	36
tabel 15	vorstheffingsnelheid en classificatie van vorstgevoeligheid van grondsoorten van dit onderzoek	36
tabel 16	resultaten van vorstheffing en vorstgevoeligheid van grondsoorten in dit onderzoek. Test 2D is als onbetrouwbaar aangemerkt en wordt daarom niet in deze lijst opgenomen.	38
tabel 17	parameters WST zand Z1 en Boomse Klei BK2	43
tabel 18	Jessberger parameters volgens F100 rapportage	46
tabel 19	invoerparameters zand Z1-1	52
tabel 20	invoerparameters Boomse Klei BK2-4	56

GROOTHEDEN EN SYMBOLEN

<i>Grootheden</i>	<i>symbool</i>
Bezwijk deviatorspanning	q_u
Bovenbelasting	σ_{vp}
Cohesie	c
Cohesie – geconsolideerd, ongedraineerd	c_{cu}
Deviatorspanning	q
Dichtheid	ρ
Dikte van de overgangszone	Δx
Druk, spanning	σ
Dwarscontractiecoëfficiënt	ν
Effectieve spanning – radiaal (σ_z, σ_3)	σ' -radiaal
Effectieve spanning – axiaal (σ_1)	σ' -axiaal
Elasticiteitsmodulus	E
Elasticiteitsmodulus E_{50}	E'_{50}
Empirische materiaalconstanten	ξ_o, σ_o, ν_o
Enthalpie	H
Fractie onbevroren water	W_u
Grondparameter (Konrad & Morgenstern, 1984)	a
Grondspanning	p
Hydraulische doorlatendheid	k
De Konrad en Morgenstern parameters. Alleen voor klei.	SP_o, a
Materiaalparameter	a
Natte dichtheid	ρ_{nat}
Normaalspanning in de richting van de temperatuursgradiënt	σ_n
Porositeit	P
Puntsgewijze grafiek van de geleiding als functie van temperatuur	$\lambda(T)$
Een puntsgewijze grafiek van de enthalpie als functie van temperatuur. Hiermee worden feitelijk de temperatuursafhankelijke warmtecapaciteit en latente warmte	$H(T)$
Een puntsgewijze grafiek van de E-modulus als functie van temperatuur	$E(T)$
Relatieve verticale uitzetting	ξ
Segregatiepotential	SP
Segregatie potential onder belasting σ_n	$SP(p)$
Segregatie potential zonder extra belasting	SP_o
Soortelijke warmte (warmtecapaciteit)	c
Spanning loodrecht op het vorstfront	σ_n
Suctie aan het lensoppervlak [m waterkolom]	h_s
Suctie aan het vriesfront [m waterkolom]	h_o

Temperatuur	T
temperatuur bij de ijslens [$^{\circ}\text{C}$]	T_s
Temperatuurgradiënt	$\frac{\text{grad } T}{T}$
Temperaturen bij start en eind van de overgangszone tussen onbevroren en bevroren grond. Alleen voor klei.	T_o, T_1
Thermale conductiviteit	λ
Verticale belasting	σ_e
Vervorming (deformatie)	ε
Volume van een eenheidsgewicht water/ijs mengsel bij de actuele temperatuur	V_f
Volume van een eenheidsgewicht water bij de initiële temperatuur	V_{fo}
Volumerek	ε_{vol}
Volumiek gewicht – droog	γ_{dr}
Volumiek gewicht – nat (natuurlijk)	γ_{nat}
Volumiek gewicht – nat verzadigd	γ_{sat}
Vorstheffingssnelheid	ξ
Void ratio / poriëngetal	e
Vriestemperatuur	T_o
Warmtecapaciteit	c
Watergehalte	w
Een op te geven factor tussen 0 en 1. Bij gedraineerd zand is de factor 0. Bij klei nadert de factor tot 1.	$f_{uitzetting}$
Een factor tussen 0 en 1, die aangeeft welk deel van de volumeverandering bij bevroren van poriënwater wordt opgenomen in ijslenzen en poriën. Alleen voor klei.	$f_{uitzetting}$

1. INLEIDING

Grondbevriezingstechnieken zijn geschikt om op milieuvriendelijke wijze en onder moeilijke bouwomstandigheden grond tijdelijk een hoge stijfheid en sterkte te geven, evenals waterondoorlatend te maken. Bevroren kan worden toegepast in watervoerende en fijnkorrelige zandlagen, maar ook in matig waterdoorlatende, slappe lagen. In Nederland zijn dergelijke technieken in het verleden sporadisch toegepast, maar ze worden steeds vaker ingezet voor de bouw van ondergrondse infrastructuur: Westerscheldetunnel, de Botlekspoortunnel, Sophiaspoortunnel, Tunnel Pannerdensch Kanaal en waarschijnlijk ook bij de komende Noord-Zuidlijn.

De kennis bij Nederlandse instituten en universiteiten van kunstmatige grondbevriezing (AGF) is relatief laag door de zeer lage frequentie van toepassing in Nederland. In het buitenland heeft onderzoek en toepassing niet stil gestaan. Voor de op stapel staande en lopende tunnelbouwactiviteiten en andere ondergrondse werken in Nederland is het noodzakelijk het kennisniveau over grondbevriezing op peil te brengen. Dit rapport is een onderdeel van het praktijkonderzoek bij de Westerscheldetunnel (F100) en vormt de weergave van de activiteiten die in Delft Cluster verband zijn uitgevoerd binnen dit praktijkonderzoek. Het voorziet in een praktisch werkplan om de kennisachterstand in te halen. Hierbij ligt het accent op de beproeving en modellering van Nederlandse grondsoorten, zoals slappe klei en veen.

De vier hoofddoelstellingen van het totale Delft Cluster project *Grondbevriezing en Civiele werken Deel 1 en Deel 2*, zoals beschreven in het Werkplan [Werkplan 2000] zijn:

- 1 Ontwikkelen van kennis over de kenmerkende fysische eigenschappen van een kunstmatig aangelegd ijslichaam en de ontwikkeling ervan in de tijd: (a) temperatuur, (b) sterkte, (c) uitzetting, (d) hydraulische effecten en (e) kruipvervorming.
- 2 Het scheppen van faciliteiten voor het bepalen van het gedrag van kunstmatig bevroren Nederlandse grondsoorten zoals slappe klei, veen en zand met laboratorium- en veldmetingen;
- 3 Beheersen van risico's bij tunnel- en ondergrondse werken van vriesactiviteiten gedurende de aanleg van civiele werken;
- 4 Uitwerken van een ontwerp- en rekensystematiek voor het gebruik van vriestechnieken onder 'Nederlandse' omstandigheden.

Het voorliggende eindrapport beslaat Deel 1 van het werkplan en behandelt 1-D vervorming bij bevroren vanaf de onderzijde van een monster (frostheave proeven) voor 4 Nederlandse grondsoorten. Daarnaast bevat het rapport een beschrijving van het aangepaste 3-D rekenmodel GeoFreeze 2.0 in DIANA.

Opgemerkt zij, dat de uitgevoerde laboratoriumproeven niet alle parameters voor dit model kunnen leveren. Daarvoor zijn naast frostheave-proeven ook triaxiaalproeven op bevroren grond nodig. Deze vormen een onderdeel van Deel 2 van het DC-project. Dit projectdeel zal worden ingebracht in een nieuw onderzoeksplan aan Delft Cluster voor de periode 2003-2007.

2. METHODEN

2.1. INLEIDING

Het huidige onderzoek bestaat uit een serie frostheave laboratoriumproeven en interpretatie van de proefresultaten. Daarnaast is een beperkt literatuuronderzoek uitgevoerd in aansluiting op eerder COB-onderzoek [COB 1999] en in het kader van een afstudeerproject van B. Schepers [Schepers 2002]. Het uitvoeren van laboratoriumproeven is nodig om gegevens te verkrijgen over: ijslensvorming, uitzetting van bevroren grond en temperatuursontwikkeling gedurende het vriesproces. Voor de uiteindelijk gewenste modelvorming is fundamentele kennisopbouw nodig over de uitzetting en de sterkte- en stijfheidontwikkeling van bevroren grond gedurende de bevroering- en ontdooifase.

Uit dit onderzoek zullen de onderlinge relaties tussen de eigenschappen en de verschillende toestandsbepalende factoren worden bepaald. Daarbij is het voor de juiste interpretatie van de proefresultaten noodzakelijk dat de doelstelling van de proeven en de beproevingstechniek (proefopstelling) eenduidig is. Er moet worden voorkomen dat een interpretatie wordt bemoeilijkt door een veelheid van zich gelijktijdig afspelende fenomenen (meerdere dimensionale vervorming- of spanningseffecten, uitzetting, consolidatie, kruip, vervorming van de apparatuur, randeffecten door temperatuurlekken). Hierom is voor een relatieve eenvoudige en internationaal gebruikelijke proefopzet gekozen.

Op hoofdlijnen zijn twee typen proeven te onderscheiden:

- **Gradiëntproeven**, waarbij over het monster een temperatuursgradiënt aanwezig is en zich in het monster eventueel een (al dan niet stationair) vorstfront bevindt. Het bekendste voorbeeld is de frostheave proef. Bij gradiëntproeven kan verder onderscheid worden gemaakt tussen:
 - > proeven waarbij een vlak vorstfront gegenereerd wordt (denk aan een cilindrisch monster met verschillende temperatuursrandvoorwaarden aan onder- en bovenkant):
 - > proeven waarbij bijvoorbeeld vanuit een holte in de as wordt gekoeld, zodat een inwendig vorstfront ontstaat.
- **Elementproeven**, waarbij het monster op ieder tijdstip in een homogene temperatuurs-, rek- en spanningstoestand blijft en waaruit het 'gewone' constitutieve gedrag kan worden afgeleid. Hieronder vallen sterkte- en kruipproeven op bevroren monsters, welke ook al in beperkte omvang in het kader van COB M530 zijn uitgevoerd. Bekende voorbeelden zijn de triaxiaalproef en de samendrukkingproef.

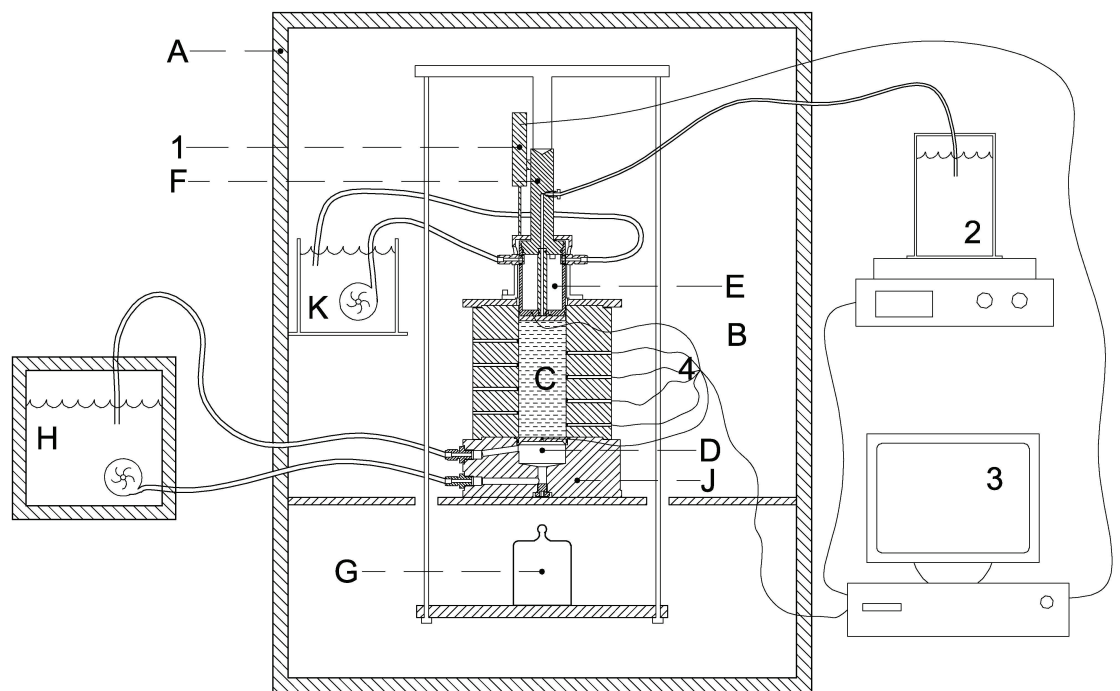
2.2. FROSTHEAVE PROEVEN

In het huidige onderzoek zijn *gradiëntproeven* (frostheave proeven) uitgevoerd. In het Werkplan [Werkplan 2002] is deze methode al kort beschreven.

De meetopstelling is de zogenaamde *frostheave cel*. Schematisch is de proefopstelling weergegeven in Figuur 1.

Een eerste kenmerk van de proef is de zijdelingse opsluiting van het monster, zodat alleen verticale uitzetting en zakking mogelijk is; dit is analoog aan de bekende samendrukkingproef. De proef leent zich daarmee niet voor schuifsterkte bepaling.

Een tweede kenmerk is de temperatuursregeling: alleen het onder- en bovenvlak is gecontroleerd. De aanname is dat de isothermen (lijnen waarover de temperatuur gelijk is) in het proefstuk horizontaal lopen; dit is echter een benadering die moeilijk te toetsen is.



Figuur 1 Schema van de gebruikte frostheave opstelling.

A = Vrieskast	F = Plunjer	1=Verplaatsingsopnemer
B = Acryl cilinder	G = Gewicht	2=Balans (volumemeting)
C = Monster	H = Koeling	3=PC (dataopslag)
D = Bodem koelbad	J = Acryl voetplaat	4=Thermokoppels
E = Top koelbad	K = Koelingsvat ("warm")	

Bij de frostheave proef wordt het monster vanaf de onderzijde bevroren en loopt het vorstfront tijdens de vriesfase omhoog door het monster heen. Deze proef levert de volgende parameters op:

- frostheave ratio: de uitzetting (hoogtetoeename) per volume eenheid ten gevolge van het eenzijdig bevriezen
- water inname ratio: het toegestroomde watervolume per volume eenheid grond
- de penetratiesnelheid van het vriesfront



Figuur 2 Foto van de frostheave cel

2.3. CLASSIFICATIE VAN GRONDSOORTEN

Bij onderzoek aan een variabel materiaal als grond hoort classificatie van de gestoken monsters. Verschillen in proefresultaten kunnen vaak gerelateerd worden aan verschillen in classificatieparameters (zie Hoofdstuk 5).

Bij vriesproeven zijn vooral het watergehalte en de korrelverdeling van belang. Verdere relevante parameters zijn:

- natte dichtheid
- humusgehalte of gloeiverlies
- kalkgehalte
- plasticiteitindex (= verschil tussen vloeigrens en uitrolgrens)

2.4. KEUZE VAN DE GRONDSOORTEN

Boomse kleimonsters (BK2) en Pleistocene zandmonsters, afkomstig van de boringen bij de eerste twee dwarsverbindingen van de Westerscheldetunnel zijn beproefd.

Verder zijn er proeven op Hollandveen (HV) uitgevoerd; hiervoor zijn monsters rond de oude Lekdijk te Bergambacht geselecteerd.

Als vierde grondsoort is gekozen voor een zachte, marine Holocene klei uit het Zuidpolder terrein van TNO te Delft; deze wordt representatief geacht voor grote delen van West Nederland. Deze klei wordt in het vervolg aangeduid met Zuidpolder klei (ZPK).

3. PROEFRESULTATEN

3.1. INLEIDING

De resultaten zullen per grondsoort behandeld worden, te beginnen met het Westerschelde zand en de Boomse klei uit het Westerschelde Tunnelproject, zie ook [CUR-COB 2002]. Daarna komen respectievelijk de Zuidpolder klei en het Hollandveen aan de orde.

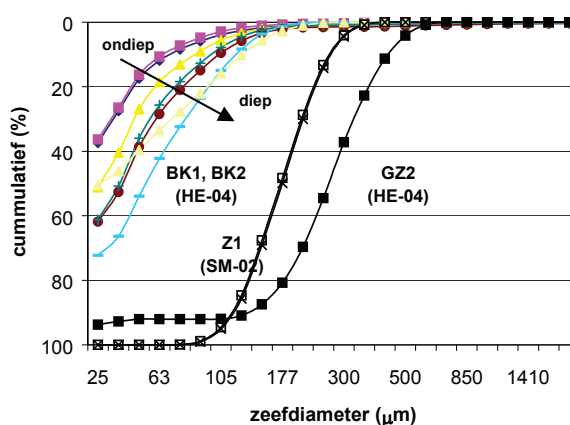
De proeffasen zijn:

- 1 monster prepareren en inzetten
- 2 op monster verticale belasting aanbrengen
- 3 koelen in vriesruimte tot $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ gedurende 24 uur; in deze fase kan het monster consolideren
- 4 bodemplaat in 1 stap afkoelen tot gewenste waarde
- 5 proef doorzetten tot evenwicht in de temperatuursverdeling (geen afname meer) en een constante heffingssnelheid is ontstaan
- 6 dooien met onderplaat op $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ en vriesruimte op $1\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 7 monster uitbouwen.

Het is wellicht nuttig om op te merken, dat de groei van de ijslens los staat van de hoogte van het monster en dus niet in termen van procentuele rek moet worden opgevat; het is een lokaal verschijnsel. De uitzetting door bevroren poriënwater in het grootste deel van het monster is wel evenredig met de hoogte tot aan de actieve ijslens.

3.2. RESULTATEN WESTERSCHELDE ZAND (Z1)

Het Westerschelde zand (*Formatie van Naaldwijk*) bestaat uit overwegend matig vast zand, is matig fijn van korrelgrootte en goed doorlatend. De korrelverdeling van het zand is weergegeven in Figuur 3, tezamen met die van de andere grondsoorten uit de lagen ter plaatse.



Figuur 3 Korrelverdelingen van de grondsoorten uit boringen HE-04 en SM-02 bij de Westerschelde tunnel (Terneuzen)

Er zijn twee proeven uitgevoerd (Tabel 1). Het zand is genomen uit boring SM-02, diepte 15.5 – 16.0 m –MV, gestoken bij dwarsverbinding DV1 van de Westerscheldetunnel.

De monsters zijn verzadigd met kraanwater, waaraan 1 g/l keukenzout is toegevoegd om aan te sluiten bij de in situ omstandigheden.

Tabel 1 Proefgegevens Westerschelde zand bij inbouw

Monster	proefcode	ρ_{nat} [kg/m ³]	n [%]	w [%]	hoogte [cm]	σ_{vp} [kPa]	T _o [°C]
Zand	Z1-1	1990	41.1	25.2	14.1	100	-10
Zand	Z1-2	1960	39.2	23.1	14.1	100	-20

Toelichting op Tabel 1:

ρ_{nat} = natte dichtheid

n = porositeit

w = watergehalte

σ_{vp} = bovenbelasting

T_o = vriestemperatuur

De resultaten worden gepresenteerd in de vorm van grafieken:

- de gemeten temperaturen rond het monster tegen de tijd (Bijlagen 3.1 en 3.3);
- de hoogte- en volumeverandering tegen de tijd (Bijlagen 3.1 en 3.3); de positieve y-as in de grafiek komt overeen met hoogtetoename (*expansie*) en met volume van instromend water (inname); deze laatste grootte zal niet geheel gelijk zijn aan de monster volumetoename vanwege het bevroren van het water;
- het temperatuursprofiel is in evenwicht (na ongeveer 80 en 65 uur, Bijlage 3.2); merk op dat het thermokoppel op h=24 mm systematisch een iets te hoge waarde oplevert. Het bleek niet goed mogelijk om hiervoor achteraf te corrigeren.

Bij proef Z1-2 is de omgevingstemperatuur tijdens de proef verhoogd omdat de bovendrainage bevroor. De verhoging is zichtbaar in de meetcurven bij t = 47 uur.

Er is geen frostheave gemeten bij deze zandmonsters. De gemeten uitdrijving van ongeveer 12 cc water is geheel te verklaren door het uitzetten van het poriënwater bij de fase overgang van water naar ijs. De dichtheid van ijs is 0.917 g/cc, wat inhoudt dat de uitzetting van het poriënwater bij bevroren 9.0 % is. Uiteraard geldt dit alleen voor het deel van het monster onder het vorstfront; dit is ongeveer 9/10 deel van het monster.

Het vriesfront bereikt in 10 uur een hoogte van ongeveer 12 cm in het zand; de snelheid is daarmee ongeveer 1.2 cm/uur.

Na het ontdooien trad er bij beide monsters een geringe zetting op van ongeveer 0.2 mm, wat overeenkomt met 0.14 % van de hoogte. Het poriënwater zet in deze fase door opwarming enigszins uit.

3.3. RESULTATEN BOOMSE KLEI (BK2)

De Boomse klei (*Laagpakket van Boom*) is een Tertiaire klei van marine oorsprong. De klei is afgezet gedurende het Oligoceen en behoort tot de Formatie van Rupel. De Boomse klei komt in het zuiden van Nederland op meerdere diepten voor, o.a. bij de Westerscheldetunnel.

Binnen het Laagpakket van Boom worden twee eenheden onderscheiden: **BK1** en **BK2**; alle proeven zijn uitgevoerd op de diepere eenheid BK2. BK2 bestaat uit zeer vaste klei, is matig tot sterk siltig met zeer dunne zandlaagjes en – lensjes, en is plaatselijk zwak tot matig siltig. BK2 wordt naar de top fijner van korrelgrootte.

De korrelverdeling is gegeven in Tabel 2 [CUR-COB 2002]; BK2 bevat gemiddeld 38 % zand.

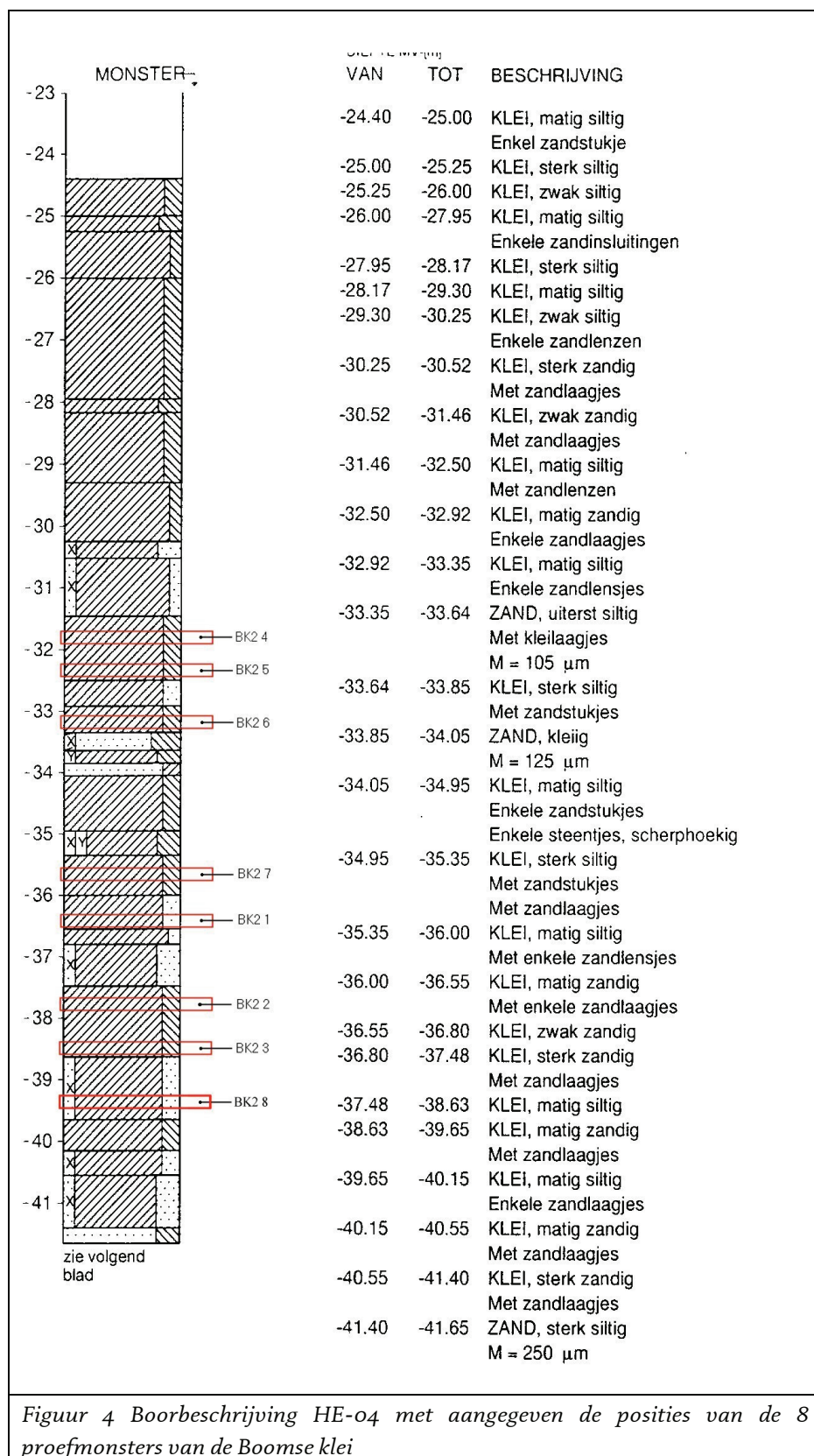
Tabel 2 Korrelfracties van de Boomse Klei

Laageenheid	< 63 µm [%] (klei+ silt fractie)	> 63 µm [%] (zand fractie)
BK1	81	19
BK2	62	38

De monsters zijn verticaal gestoken bij dwarsverbinding DV2 van de Westerscheldetunnel met een puls boring, vanaf 25 m tot 40 m –MV, zie Figuur 4. Tabel 3 toont de proefgegevens van de 8 geselecteerde monsters.

Tabel 3 Gegevens van de BK2 frostheave proefmonsters

Coderin g	Diepte [m –MV]	Druk [kPa]	Temp [°C]	H-init [cm]	W- init [%]	Vol.gew. start [g/cm ³]	H-eind [cm]	Vol.gew. eind [g/cm ³]
BK2-1	36,35 – 36,55	100	-5	14,0	21,6	1,99	14,1	1,99
BK2-2	37,70 – 37,90	100	-5	14,0	25,9	2,01	14,0	2,02
BK2-3	38,44 – 38,64	100	-10	14,1	23,9	2,00	14,2	2,00
BK2-4	31,75 – 31,95	100	-20	15,0	26,0	2,02	15,1	2,01
BK2-5	32,20 – 32,40	300	-5	14,0	23,5	2,03	14,1	2,03
BK2-6	33,15 – 33,35	300	-20	14,1	23,9	1,99	14,1	1,96
BK2-7	35,65 – 35,82	5	-5/-10/- 20	14,1	24,6	2,01	14,6	1,98
BK2-8	39,15 – 39,35	300	-10	14,1	23,1	1,96	14,1	1,98



Figuur 4 Boorbeschrijving HE-04 met aangegeven de posities van de 8 proefmonsters van de Boomse klei

Bij de eerste proef BK2-1 zijn door een externe stroomstoring alle meetdata gewist. Deze proef wordt daarom niet verder behandeld en wordt hier alleen voor de volledigheid vermeld; proef BK2-2 is onder gelijke randcondities uitgevoerd.

Proef BK2-7 is afwijkend in de zin van de temperatuursconditie; de bodemplaat is stapsgewijs gekoeld op drie niveaus; dit om te kijken wat de temperatuur doet bij een verder zoveel mogelijk gelijk monster. Bovendien is bij deze proef de belasting minimaal van grootte om een betere indruk van de spanningsafhankelijkheid van de frostheave te krijgen. De in situ verticale druk bedraagt ongeveer 300 kPa, en is daarmee gelijk aan de maximale proefbelasting.

3.3.1. PROEF BK2-2

De resultaten staan in de volgende bijlagen:

- de gemeten temperaturen rond het monster en de hoogte- en volumeverandering tegen de tijd (Bijlage 3.4);
- het temperatuursprofiel in evenwicht (Bijlage 3.5)

Er is een geringe frostheave van ongeveer 1 mm gemeten bij dit monster. De gemeten inname van ongeveer 2 cc water is grotendeels te verklaren door de groei van de actieve ijslens [Schepers 2002, Konrad 1983]. Het vriesfront bereikt in de eerste 12 uur een hoogte van ongeveer 8 cm in de klei; de snelheid van dit front is daarmee ongeveer 0.7 cm/uur.

3.3.2. PROEF BK2-3

Deze proef verschilt van de vorige door de lagere bodemtemperatuur (-10 °C).

De resultaten staan in de volgende bijlagen:

- de gemeten temperaturen en hoogte- en volumeverandering tegen de tijd (Bijlage 3.6);
- het temperatuursprofiel in evenwicht (Bijlage 3.5)

Er is een geringe frostheave van ongeveer 1.5 mm gemeten bij dit monster. De gemeten inname van ongeveer 1 cc water is te laag, vanwege tijdelijke uitval van de balansregistratie. Het vriesfront bereikt in de eerste 14 uur een hoogte van ongeveer 10 cm in de klei; de snelheid van dit front is daarmee ongeveer 0.7 cm/uur.

Na het ontdooien trad er door het verdwijnen van de actieve ijslens een zetting op van ongeveer een 1 mm, zie Bijlage 3.6.

3.3.3. PROEF BK2-4

Deze proef verschilt van de vorige door de lagere bodemtemperatuur (-20 °C).

De resultaten zijn:

- de gemeten temperaturen en de hoogte- en volumeverandering tegen de tijd (Bijlage 3.7);
- het temperatuursprofiel in evenwicht (Bijlage 3.8)

Er is een frostheave van ongeveer 3 mm gemeten bij dit monster. De gemeten waterinname is ongeveer 5 cc. Het vriesfront bereikte in 20 uur een hoogte van ongeveer 13 cm in de klei; de snelheid van dit front is daarmee weer ongeveer 0.7 cm/uur.

Na het ontdooien trad er een zetting op van ruim 1 mm door smelten van de ijslens en nog een zeer kleine restzetting (Bijlage 3.7).

3.3.4. PROEF BK2-5

Deze proef is uitgevoerd met een hoge belasting van 300 kPa en een bodemtemperatuur van -5°C .

De resultaten staan in de volgende bijlagen:

- de gemeten temperaturen en hoogte- en volumeverandering tegen de tijd (Bijlage 3.9);
- het temperatuursprofiel in evenwicht (Bijlage 3.8).

Er is geen merkbare frostheave gemeten bij dit monster. De gemeten waterinname is ook verwaarloosbaar. Het vriesfront bereikte in 12 uur een hoogte van ongeveer 8 cm in de klei; de snelheid van dit front is daarmee weer ongeveer 0.7 cm/uur.

Na het ontdooien trad er nauwelijks zetting op.

3.3.5. PROEF BK2-6

Deze proef is net als BK2-5 uitgevoerd met een belasting van 300 kPa; de bodemtemperatuur was nu echter -20°C . De resultaten staan in de bijlagen 3.10 en 3.11.

Er is 1.3 mm zetting door consolidatie opgetreden in de fase voor het vriezen. De frostheave daarna bedroeg ongeveer 3 mm. De gemeten waterinname was in deze fase 6 cc. Het vriesfront bereikte in 16 uur een hoogte van ongeveer 13 cm in de klei; de snelheid van dit front is daarmee ongeveer 0.8 cm/uur.

Na het ontdooien trad er een relatief forse zetting op van ruim 3 mm, vooral door het verdwijnen van de ijslens.

3.3.6. PROEF BK2-7

Deze proef is uitgevoerd bij een lage belasting van 5 kPa; de bodemtemperatuur is stapsgewijs opgevoerd via -5 en -10 naar -20°C . De resultaten staan in de bijlagen 3.11 en 3.12.

Bijlage 3.12 toont dat de frostheave vooral in de laatste vriesstap flink toeneemt, van 3 tot bijna 10 mm. De gemeten waterinname was in deze fase 16 cc. Het vriesfront verplaatst zich per stap omhoog met een eindhoogte van ongeveer 13 cm (Bijlage 3.11).

Na het ontdooien trad er een zetting op van 4.5 mm. De gemeten eindhoogte bleek 5 mm boven de start hoogte te liggen; dit is verreweg de grootste hoogte toename van alle proeven op Boomse klei, zie ook Tabel 3.

3.3.7. PROEF BK2-8

Deze proef is gedaan bij hoge belasting (300 kPa); de bodemtemperatuur tijdens de vriesfase is -10°C . De resultaten staan in de bijlagen 3.13 en 3.14.

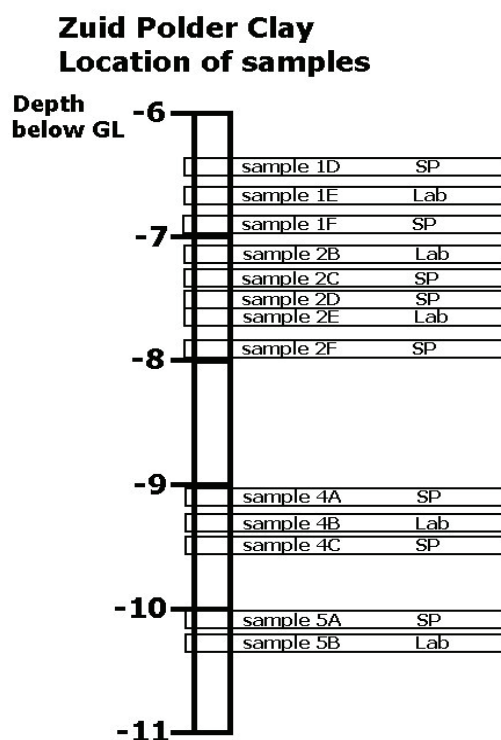
De gemeten frostheave is zeer gering. De gemeten waterinname geeft een erratisch beeld te zien en komt tijdens het vriezen niet boven 1 cc uit; bij het dooien wordt 3 cc bereikt als maximum. Het vriesfront verplaatste zich met een snelheid van gemiddeld 0.7 cm/uur naar een eindhoogte van ongeveer 11 cm.

Tijdens het ontdooien trad er een zetting op van 0.6 mm. De eindhoogte van het monster was gelijk aan de starthoogte.

3.4. RESULTATEN ZUIDPOLDER KLEI

De Zuidpolder klei (*Laagpakket van Wormer*) maakt deel uit van de Westland Formatie en is een Holoceen zeekleisediment. De klei is zeer zacht met een hoog watergehalte. Plaatselijk komen schelpen en organisch materiaal voor. Ook zand en siltaagjes worden aangetroffen.

De monsters zijn met een puls boring gestoken te Delft, op het TNO terrein. De PVC bussen van 1 m lengte zijn uitgelegd in de schouwruimte van GD. Op de geselecteerde stukken zijn altemnerend classificatie- (code :Lab) en frostheave proeven (code :SP) gedaan, zie Figuur 5. De monsterkwaliteit is niet optimaal door de opslag in de zomerperiode in een niet gekoelde loads. Er heeft evenwel geen uitdroging plaatsgevonden.



Figuur 5 schema proeven Zuidpolderklei tegen diepte (m-MV)

Onderstaande tabel 4 bevat resultaten van de diverse classificatieproeven die zijn uitgevoerd op de verschillende monsters.

De kleilaag blijkt heterogener te zijn dan aanvankelijk was verondersteld. Het deel boven 8 m –MV (monsters 1e, 2b en 2e) is zeer plastisch met een hoog humus- en kleigehalte.

Tabel 4 Classificatie gegevens van de Zuidpolder klei

monster	diepte [m-MV]	humus- gehalte [%]	CaCO ₃ gehalte [%]	Plasticiteit index [%]	k (30 kPa) [m/s]	k (60 kPa) [m/s]	f < 2 µm [%]	w [%]
1e	6.7	6,6	11,5	83,9	5,4E-10	4,3E-10	42,2	89,7
2b	7.1	6,7	11,7	79,8	4,5E-10	3,4E-10	38,6	83,4
2e	7.6	10,1	5,0	100,8	3,7E-10	2,5E-10	34,5	93,5
4b	9.2	2,5	12,7	20,3	9,0E-09	8,2E-09	16,8	44,2
5b	10.2	4,8	13,2	48,0	2,5E-09	2,2E-09	29,0	58,2

Gezien het feit, dat juist siltige klei vaak het meest vorstgevoelig is, is de verwachting dat een trend van lagere frostheave met hogere plasticiteits index zichtbaar wordt. De diepe monsters ZPK-4 t/m 6 zouden dan het gevoeligst zijn.

Tabel 5 geeft een overzicht van de proefgegevens.

Tabel 5 Gegevens van de ZPK frostheave proefmonsters¹

Codering	Diepte [m -MV]	Druk [kPa]	Temp [°C]	H-init [cm]	W- init [%]	Vol.gew. start [g/cm ³]	H-eind [cm]	Vol.gew. eind [g/cm ³]
ZPK-1 (1D)	6,4	10	-10	13,5	83,1	1,45	12,4	1,50
ZPK-2 (1F)	6,9	35	-10	13,2	86,8	1,46	12,2	1,50
ZPK-3 (2C)	7,4	100	-10	13,5	85,2	1,44	12,0	1,51
ZPK-4 (4A)	9,1	100	-20	14,0	47,2	1,73	12,9	1,79
ZPK-5 (4C)	9,5	10	-20	14,0	46,1	1,67	13,4	1,73
ZPK-6 (5A)	10,1	50	-20	14,0	44,8	1,69	13,0	1,75

3.4.1. PROEVEN ZPK-1 T/M ZPK-3

Deze proeven zijn uitgevoerd met een bodemtemperatuur van – 10 °C. De resultaten staan weergegeven in de bijlagen 3.15 t/m 3.20.

Bij ZPK-1 is er een duidelijke frostheave gemeten van ongeveer 8 mm. De gemeten waterinname komt maximaal op 11 cc. Het vriesfront stelt zich beduidend langzamer in dan bij de Boomse klei; in 35 uur wordt een hoogte van ongeveer 12 cm bereikt. De snelheid van dit front is daarmee ongeveer 0.3 cm/uur.

Tijdens en na het ontdooien trad er een forse zetting op van circa 20 mm. De gemeten eindhoogte was ruim 1 cm lager dan de starthoogte (13.5 cm, zie Tabel 5), ofwel 8.1%. Dit is een duidelijk verschil ten opzichte van de Boomse Klei.

Bij ZPK-2 is er ca. 2 mm zetting door consolidatie opgetreden in de fase voor het vriezen. De frostheave daarna bedroeg ongeveer 6 mm. De gemeten waterinname was in deze vriesfase 12 cc. Het vriesfront bereikte in 30 uur een hoogte van ongeveer 12 cm in de klei; de snelheid van dit front is daarmee gemiddeld ongeveer 0.4 cm/uur.

¹ Test 2D is als onbetrouwbaar aangemerkt en wordt daarom niet in deze lijst opgenomen.

Tijdens en na het ontdooien trad er een forse zetting op van 17 mm. De gemeten eindhoogte kwam 1 cm lager uit dan de starthoogte; dit is 8% van de monsterhoogte. Dus ook bij deze proef heeft de vries-dooicyclus een fors zettingseffect, dat niet alleen aan consolidatie kan worden toegeschreven. De consolidatie zal bij deze klei en deze monsterhoogte langer duren dan 24 uur; bij deze proef is duidelijk nog geen eindzetting bereikt.

Bij de proef ZPK-3 is er ca. 6 mm zetting door consolidatie is opgetreden in de fase voor het vriezen. De frostheave daarna bedroeg ongeveer 4 mm. De gemeten waterinname was in deze vriesfase ongeveer 10 cc. Het vriesfront bereikte in 30 uur een hoogte van ongeveer 12 cm in de klei; de snelheid van dit front is daarmee gemiddeld weer 0.4 cm/uur.

Tijdens en na het ontdooien trad er weer een forse zetting op van 17 mm. De gemeten hoogte bij het stoppen van de proef kwam 15 mm lager uit dan de starthoogte; dit is ruim 10 % van de monsterhoogte.

3.4.2. PROEVEN ZPK-4 T/M ZPK-6

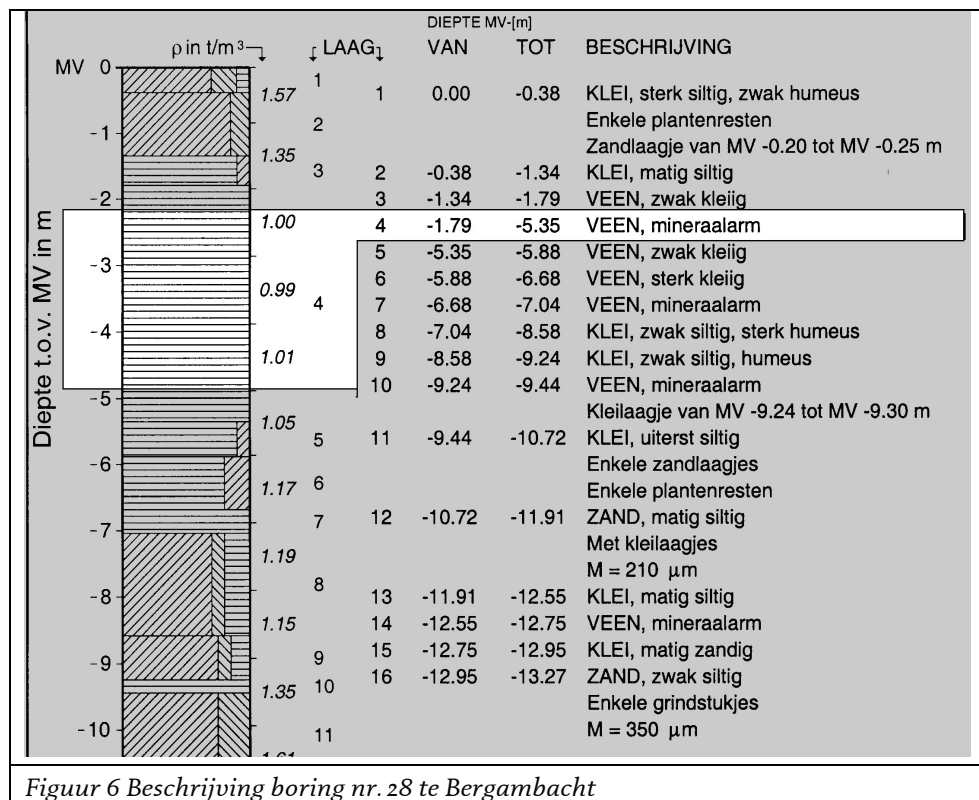
De serie ZPK-4 t/m ZPK-6 is een herhaling van de eerste drie proeven maar dan met een lagere vriestemperatuur van -20 °C. Monster ZPK-4 is belast met 100 kPa en ZPK-5 met 10 kPa; de 50 kPa belasting van ZPK-6 komt overeen met de geschatte in situ verticale effectieve druk. De resultaten staan in de bijlagen 3.19 t/m 3.23.

Het vriespatroon van deze proeven komt min of meer overeen met de andere drie proeven op Zuidpolderklei. Opvallend is de sterke wateruitdrijving bij proef ZPK-4, ca. 35 cc (bijlage 3.20). In alle gevallen zorgt de vries-dooicyclus voor een fors zettingseffect van circa 7%, naast de 3 tot 5 mm aan zetting die door consolidatie wordt veroorzaakt.

3.5. HOLLANDVEEN

Het beproefde Hollandveen (*Formatie van Nieuwkoop*) is afkomstig uit het proefvak Bergambacht. In dit proefvak is veel grondonderzoek verricht in verband met het laten bezwijken van een stuk oude dijk in het najaar van 2001. Veen komt veel voor in West Nederland, maar van de vries- en dooi-eigenschappen is bijna niets bekend.

De monsters zijn verkregen met een Begemann 66 mm -boring. Figuur 6 toont de boorbeschrijving van boring nr. 28 (CO-710203, hoofdtraai Bergambacht achterland), welke is gebruikt voor alle veenmonsters. Het veen wordt beschreven als: Zeggeveen, mesotroof met lage tot matige verweringsgraad. Opgemerkt wordt dat de terreinspanning zeer laag is (orde 5 kPa) vanwege de dunne klei-deklaag.



Figuur 6 Beschrijving boring nr. 28 te Bergambacht

Tabel 6 Classificatie van de Hollandveen monsters

proef	monster	diepte [m-MV]	humus-gehalte [%]	spec. massa [kg/m³]	w [%]
HV-1	42a	2.30	60		447
HV-2	42b	2.50			437
HV-3	42c	2.70		1670	567
HV-4	42e	3.10		1670	450
HV-5	43b	3.50		2050	244
HV-6	43c	3.70	76	1580	400
HV-7	44d	4.90	49	1870	312
HV-8	44b	4.50	76	1580	713

Tabel 6 toont enkele classificatiegegevens; in een aantal gevallen zijn deze bepaald op naburige monsters. Het watergehalte is steeds bepaald op afsnijdsels.

Tabel 7 Gegevens van de HV frostheave proefmonsters

proef	Druk [kPa]	Temp [°C]	H-start [cm]	W-start [%]	Vol.gew start [g/cm³]	H-eind [cm]	W-eind [%]	Vol.gew eind [g/cm³]
HV-1	10	-10	13.4	437	0.98	12.9	443	1.06
HV-2	20	-10	14.0	447	1.02	12.2	463	1.06
HV-3	40	-10	14.2	567	0.95	12.0	501	1.02
HV-4	10	-20	14.2	450	0.96	13.8	588	1.03
HV-5	20	-20	14.0	244	1.15	12.0	216	1.20
HV-6	40	-20	14.0	400	1.08	12.3	370	1.09
HV-7	10	-20	14.0	312	1.12	13.2	270	1.13
HV-8	20	-20	14.0	713	1.05	12.9	414	1.08

Tabel 7 geeft een overzicht van de 8 frostheave proeven op het Hollandveen. Het zal duidelijk zijn uit de watergehaltegegevens dat de veenlaag tamelijk heterogeen is, zoals meestal het geval is in West Nederland. Niettemin geven deze 8 proeven een aardig beeld van het vriesgedrag.

De proeven worden in twee groepen behandeld; groep 1 is bij -10°C uitgevoerd en vertoont weinig frostheave. Groep 2 is bij -20°C gedaan en laat relatief veel heffing zien.

3.5.1. PROEVEN HV-1 T/M HV-3

De resultaten van de serie HV-1 t/m HV-3 zijn grafisch weergegeven in de Bijlagen 3.24 t/m 3.28.

Het vriespatroon van deze drie proeven komt in grote lijnen overeen; de verschillen treden vooral op in de zetting tijdens de dooifase. De frostheave is praktisch nul. In de dooifase neemt de zetting duidelijk toe met de opgelegde belasting; wat ook duidelijk af te leiden is uit het verschil tussen begin en eindhoogte in Tabel 7 (0.5 tot 2.2 cm). Men moet hierbij bedenken, dat zonder vriezen en dooien de zetting van het Hollandveen duidelijk lager dan de gemeten waarden uit zal komen door consolidatie en kruip, zie ook Tabel 8.

De snelheid van het vriesfront in de veenmonsters bedraagt ruwweg 10 cm/50 uur, ofwel 0.2 cm/uur. Dit is lager dan de snelheid bij de kleiproeven.

3.5.2. PROEVEN HV-4 T/M HV-8

De resultaten van de serie frostheave proeven HV-4 t/m HV-8 zijn grafisch weergegeven in de Bijlagen 3.28 t/m 3.35.

Tabel 8 geeft aan hoeveel heffing er is opgetreden bij het vriezen en hoeveel zetting daarna tijdens het dooien optrad. Daarvoor is de zetting door consolidatie (1 dag) aangegeven.

Tabel 8 Resultaten proeven op veen bij -20°C

proef	druk [kPa]	Consolidatie [mm]	frostheave [mm]	zetting bij dooi [mm]
HV-4	10	1	0.5	11
HV-5	20	1	6	24
HV-6	40	2	8	23
HV-7	10	2	4	10
HV-8	20	1	4	10

Proef HV-4 valt uit de toon met een lage frostheave van 0.5 mm. Dit is opvallend, juist vanwege de lage belasting (10 kPa); de frostheave neemt normaliter toe met afnemende druk. Proef HV-6 laat daarentegen een hoge frostheave bij relatief hoge druk (40 kPa) zien. Ook de zetting in de dooifase is bij deze proef groot. In het volgende hoofdstuk wordt ingegaan op de eventuele correlatie van deze metingen met classificatieparameters van de monsters.

4. INTERPRETATIE

4.1. INLEIDING

De interpretatie zal per grondsoort geschieden. Aan het eind van dit hoofdstuk zal een algehele vergelijking van de vier grondsoorten gemaakt worden.

Algemeen geldt dat de vorstgevoeligheid afhangt van de doorlatendheid en de samenstelling (korrelverdeling, type mineralen, humusgehalte e.d.) van de grond. Een goed doorlatende grondsoort zal weinig gevoelig zijn, omdat water vrij toe en af kan stromen. Een zeer slechte doorlatende grond zal eveneens weinig vorstgevoelig zijn, omdat de watertoestroming naar de actieve ijslens beperkt is in de tijd. De problemen liggen daarom in het tussengebied, grofweg bij wat men siltige klei noemt.

Bij dit onderzoek is de verwachting daarom dat de meeste frostheave bij de beide kleisoorten zal optreden.

De vorstgevoeligheid (frostheave en structuurverlies) kan op meerdere manieren geanalyseerd worden. Vrij gangbaar is de methode van Konrad [Konrad 1983], waarbij een zogenaamde SP-waarde bepaald wordt. SP staat voor “segregation potential”. Een hoge SP-waarde betekent dat de grond veel water kan aanzuigen aan het vorstfront en daarmee vorstgevoelig is.

De SP methode komt neer op het bepalen van:

- de hoogte toename aan het vorstfront in mm/hr tijdens temperatuurevenwicht; dit kan op twee manieren: via de zettingsmeting [Jessberger 1998] of via het volume aangezogen water [Konrad 1983] (waterbalans).
- de temperatuurgradiënt aan het vorstfront in °C/mm tijdens evenwicht
- de verhouding tussen bovengenoemde grootheden volgens:

$$SP = \frac{v}{gradT} \left[\frac{mm^2}{^{\circ}C * hr} \right] \quad (1)$$

met:

v = hoogte toename [mm/hr]
 $gradT$ = temperatuurs gradiënt bij het vorstfront [°C/mm]

Een tweede methode wordt veel in Japan toegepast en gaat uit van de maximale frostheave in relatie met belasting (in situ druk) en vriessnelheid. Ohrai [Ohrai 1991] geeft de volgende empirische formule:

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma_e} \left(1 + \sqrt{\frac{v_0}{v}} \right) \quad (2)$$

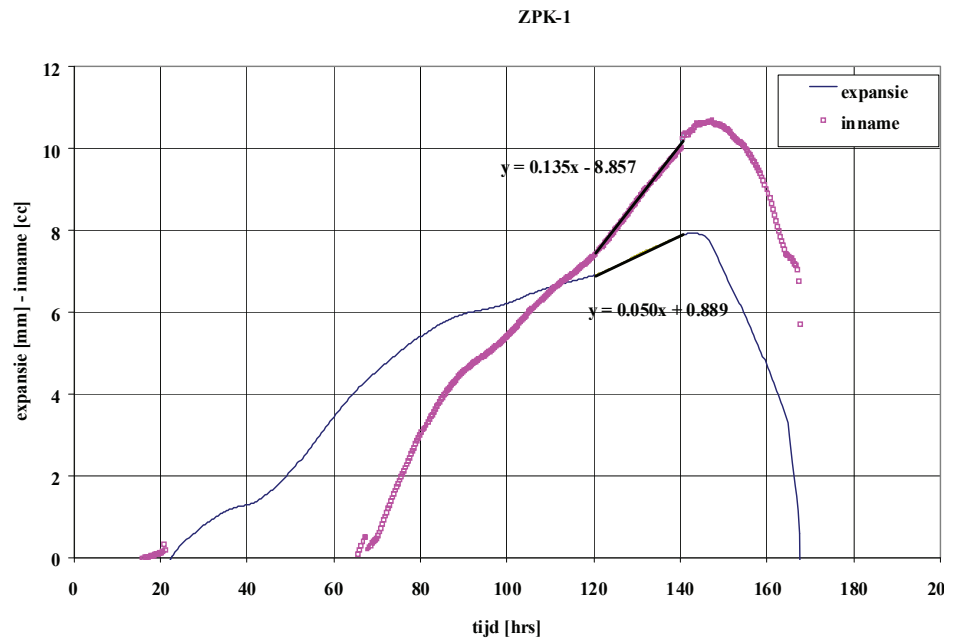
met:

ξ = $\Delta V/V = \Delta h/H$ = relatieve verticale uitzetting [-]
 v = snelheid van het vriesfront [mm/hr]
 σ_e = verticale belasting [kPa]
 ξ_0, σ_0, v_0 = empirische materiaalconstanten

Er zij opgemerkt dat deze methode alleen een tijdsafhankelijke, procentuele uitzetting levert en dus modelmatig inferieur is aan de Konrad beschrijving.

De materiaalparameters worden gehaald uit frostheave proeven. Vergelijking (2) geeft aan, dat de frostheave praktisch omgekeerd evenredig is met de belasting en ook afneemt met toenemende vriessnelheid. In dit rapport zal alleen de methode Konrad uitgewerkt worden, omdat de Japanse aanpak (Ohrai) minder goed en minder gangbaar is.

Figuur 7 illustreert de regressiemethode, waarmee de parameter SP bepaald wordt. Het is hierbij nodig dat de proef een lineair groeideel bevat.



Figuur 7 Regressielijnen ter bepaling van de water inname snelheid

4.2. WESTERSCHELDE ZAND

Geologische benaming: Laagpakket van Walcheren, Formatie van Naaldwijk

De grondsoort bestaat uit overwegend matig vaste zand, is matig fijn van korrelgrootte en is goeddoorlatend.

Deze grondsoort behoeft weinig toelichting op de reeds gepresenteerde resultaten. Zoals verwacht is er geen frostheave gemeten bij dit zand. De gemeten uitdrijving van water is geheel te verklaren door het uitzetten van het poriënwater bij de fase overgang van water naar ijs.

Het snelheid van het vriesfront is ongeveer 1.2 cm/uur, hetgeen de hoogste waarde is van de vier beproefde grondsoorten. De zetting ten gevolge van de vries-dooicyclus is verwaarloosbaar.

4.3. BOOMSE KLEI

Geologische naam: Laagpakket van Boom, Formatie van Rupel

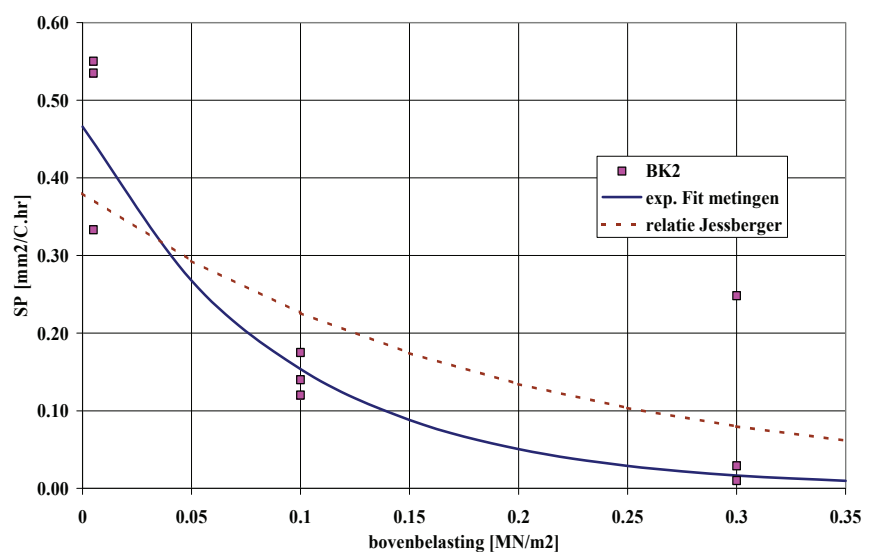
De klei van het Laagpakket van Boom bestaat uit zeer vaste klei, is matig tot sterk siltig en bevat lokaal zeer dunne zandlaagjes en –lensjes en is plaatselijk zwak tot matig siltig. De klei is dus gelaagd van opbouw en daarmee anisotroop. Er zijn grote verschillen gemeten (tot een factor 30) in de horizontale en verticale doorlatendheid, wat zeker zijn invloed zal hebben op de vries eigenschappen als functie van de richting.

De frostheave proeven zijn alle uitgewerkt in [Schepers 2002] volgens de methode van Konrad, zie ook sectie 4.1.

De verschillen tussen de uitwerking aan de hand van de hoogte toename (h) en met de waterbalans (w) bleken gering, zie Tabel 9. De resultaten voor de Boomse klei BK2 worden weergegeven in Tabel 9 en Figuur 8.

Tabel 9 Berekende SP waarden voor de Boomse klei²

Proef	SP(h) [mm ² /°C hr]	SP(w) [mm ² /°C hr]	Belasting [kPa]	temperatuur onder [°C]
BK2-2	0.12	0.10	100	-5
BK2-3	0.14	0.00	100	-10
BK2-4	0.18	0.16	100	-20
BK2-5	0.03	0.01	300	-5
BK2-6	0.25	0.21	300	-20
BK2-7	0.33	0.31	5	-5
BK2-7	0.54	0.51	5	-10
BK2-7	0.55	0.48	5	-20
BK2-8	0.01	0.00	300	-10



Figuur 8 SP waarden van Boomse klei BK2 als functie van de bovenbelasting

² Proef 7 levert per temperatuursverlagingsstap één SP waarde op, in totaal 3 waarden.

Bij het bepalen van de regressiecurve in Figuur 8 is het sterk afwijkende punt van proef BK2-6 (hoge SP waarde) niet meegenomen. De vergelijking van de curve is:

$$SP(p) = 0,466 \exp(-11,1p) \quad [\text{mm}^2/^\circ\text{C}\cdot\text{hr}]$$

met p = bovenbelasting in MPa.

De constante 0,466 is een maat voor de SP_0 waarde, ofwel de segregatie potentiaal bij een bovenbelasting van nul. De coëfficiënt $-11,1$ geeft de spanningsafhankelijkheid weer. Jessberger [Jessberger 1998] heeft ook frostheave proeven op Boomse klei gedaan en vond:

$$SP(p) = 0,38 \exp(-5,2p) \quad [\text{mm}^2/^\circ\text{C}\cdot\text{hr}]$$

Deze functie is ook opgenomen in figuur 8. Jessberger vindt daarmee een minder sterke spanningsafhankelijkheid, maar baseert daarbij zijn functie op slechts twee metingen (bij 23 kPa en 450 kPa).

4.4. ZUIDPOLDER KLEI

Geologische benaming: Laagpakket van Wormer, Formatie van Naaldwijk

De lithologische opvolging van dit laagpakket is opgebouwd uit grijze zwak siltige kleien. Het pakket is humeus en lokaal sterk zandig. De klei bevat organisch materiaal en schelpen.

De uitgewerkte SP waarden van de 6 geslaagde proeven staan weergegeven in Tabel 10.

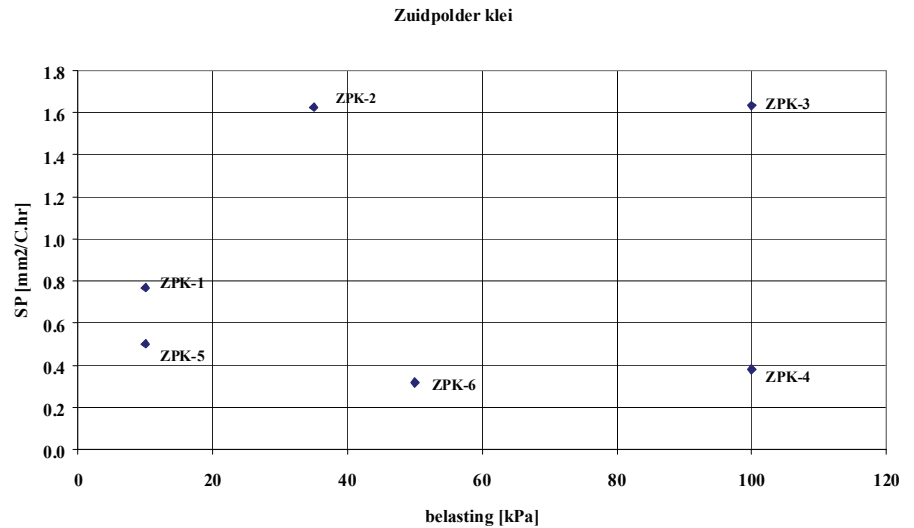
De SP waarde blijkt niet goed te correleren met de belasting (Figuur 9). De mogelijke oorzaak hiervoor is de sterke heterogeniteit van de klei. Om dit nader te onderzoeken, is de SP-waarde uitgezet tegen een aantal variabelen [Schepers 2002].

Een belangrijke grootheid is de korrelverdeling. Vooral de kleifractie (Figuur 10) is van belang, omdat hier de doorlatendheid sterk van afhangt. Er is in Figuur 10 een lichte trend zichtbaar van toenemende vorstgevoeligheid (SP) met toenemende kleifractie. Het aantal meetpunten is echter te klein om hier al te sterke conclusies aan te verbinden.

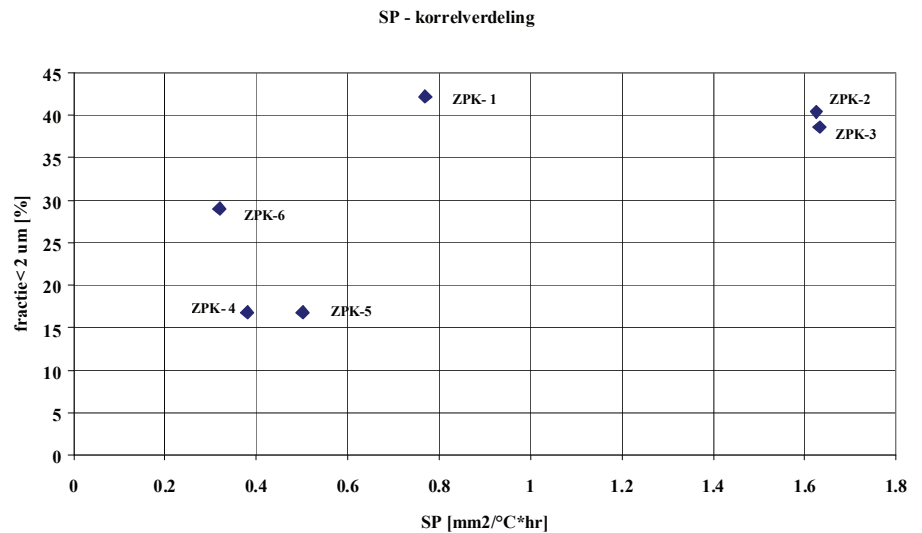
Soortgelijke trends vindt men bij correlatie van SP tegen plasticiteitsindex, doorlatendheid en gloeiverlies, zie ook H5. Men bedenke hierbij, dat de classificatieproeven op naburige monsters zijn bepaald, die mogelijk af zullen wijken van de vriesmonsters.

Tabel 10 Overzicht SP waarden per proef

Proef	SP [mm ² / °C hr]	Belasting [kPa]	Temperatuur [°C]
ZPK-1	0.77	10	-10
ZPK-2	1.63	35	-10
ZPK-3	1.63	100	-10
ZPK-4	0.38	100	-20
ZPK-5	0.50	10	-20
ZPK-6	0.32	50	-20



Figuur 9 SP-waarden Zuidpolderklei tegen belasting



Figuur 10 SP waarden tegen kleifractie

4.5. HOLLANDVEEN

Geologische benaming: Formatie van Nieuwkoop

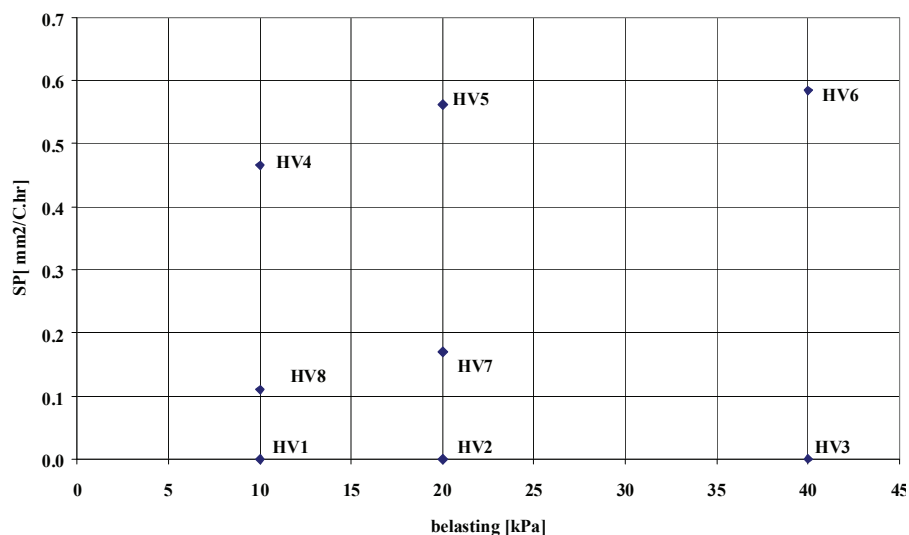
De proeven zijn naar SP waarden uitgewerkt op de manier zoals bij de Boomse klei is aangegeven.

Er blijkt er geen goed verband te bestaan tussen de belasting en de SP-waarde, zie Tabel 11 en Figuur 11. In het vorige hoofdstuk is dit ook al aangegeven; de mate van frostheave blijkt vooral van de vriestemperatuur af te hangen. Bij -20°C wordt een SP waarde van 0.11 tot 0.55 mm²/°C.hr gevonden, bij -10°C is deze praktisch nul.

Een hogere vriestemperatuur betekent een hogere ligging van het vriesfront in het monster, zie bijvoorbeeld Bijlage 3.11. Hierdoor kan het water vanaf de bovenkant wat makkelijker toestromen (minder grondweerstand). Dit kan echter de nulwaarden van de SP bij proeven HV-1 t/m HV-3 niet verklaren. Bovendien is het veen betrekkelijk goed doorlatend.

Tabel 11 SP-waarden bepaald voor de veenproeven

Proef	SP [mm ² / °C hr]	Belasting [kPa]	Temperatuur [°C]
HV-1	0.00	10	-10
HV-2	0.00	20	-10
HV-3	0.00	40	-10
HV-4	0.47	10	-20
HV-5	0.56	20	-20
HV-6	0.58	40	-20
HV-7	0.17	20	-20
HV-8	0.11	10	-20



Figuur 11 Hollandveen: SP als functie van de verticale belasting

Het veen wordt evenals de ZPK gekenmerkt door grote heterogeniteit, het watergehalte bijvoorbeeld varieert tussen 244% en 567%, zie Tabel 6.

In [Schepers 2002] is nagegaan of er correlaties met humusgehalte e.d. bestaan; dit blijkt niet het geval te zijn.

De metingen geven in ieder geval aan, dat de vorstgevoeligheid van veen niet bijzonder groot is, dat wil zeggen kleiner dan bij de Zuidpolderklei en vergelijkbaar met de Boomse klei. De foto's tijdens het vriezen geven geen duidelijke ijslensvorming weer, in tegenstelling tot de kleiproeven.

Minder duidelijk zijn de gevolgen voor het zettinggedrag na vriezen en ontdooien. Vanwege de relatief grote wandwrijving bij de huidige proeven is een vergelijking met standaard samendrukkingproeven op veen niet direct te maken. Een specifiek zettingsonderzoek met vergelijkbare samendrukkingproeven op wel en niet bevroren monsters is noodzakelijk om hier harde uitspraken over te kunnen doen. De voorlopige indruk bestaat, dat het vriezen en dooien een beperkt effect heeft op de veenstructuur. Men bedenke hierbij, dat het gebruikte veen grotendeels uit water bestaat.

4.6. IJSLENSFORMING

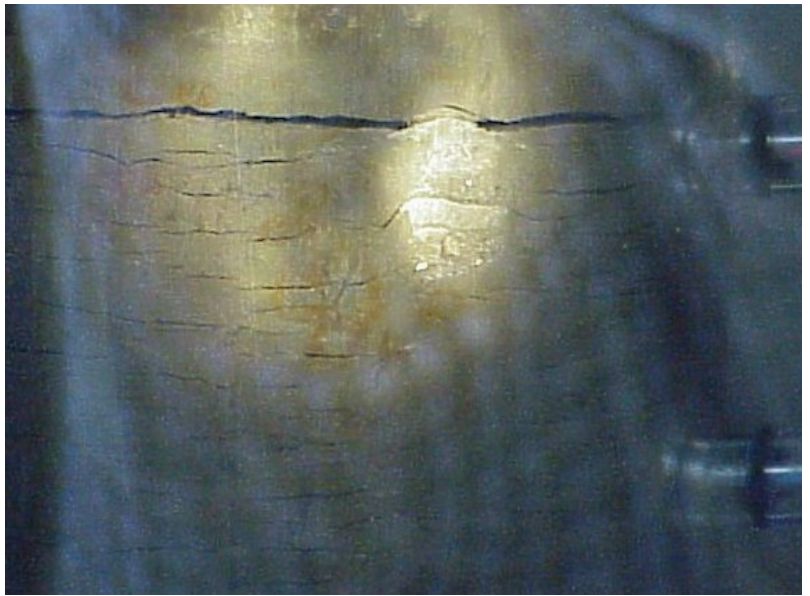
Ijsslenszen werden alleen bij de proeven op klei waargenomen, en dan nog niet bij alle proeven, zie Tabel 12. Met “temperatuur ijslens” in de tabel wordt de geïnterpoleerde temperatuur ter hoogte van de actieve, dus bovenste ijslens bedoeld. Deze ligt vrijwel steeds tussen 0 en -1°C .

Tabel 12 Gegevens over de ijslensvorming bij de proeven op Boomse en Zuidpolder klei

Proef	Zichtbaarheid ijslens	Temperatuur ijslens [$^{\circ}\text{C}$]	Belasting [kPa]	Temperatuur bodem [$^{\circ}\text{C}$]	SP (h) [$\text{mm}^2 / ^{\circ}\text{C hr}$]
BK2-2	matig	-0.8	100	-5	0.12
BK2-3	matig	-1.0	100	-10	0.14
BK2-4	goed	-0.8	100	-20	0.18
BK2-5	matig	-1.0	300	-5	0.03
BK2-6	goed	-0.5	300	-20	0.25
BK2-7	niet		5	-20	0.55
BK2-8	niet		300	-10	0.01
ZPK-1	goed	-0.2	10	-10	0.77
ZPK-2	matig	-0.3	35	-10	1.63
ZPK-3	goed	-0.3	100	-10	1.63
ZPK-4	niet		100	-20	0.38
ZPK-5	matig	-0.2	10	-20	0.50
ZPK-6	niet		50	-20	0.32

De actieve ijslens in de Boomse klei ligt bij een lagere temperatuur dan bij de Zuidpolder klei. De Boomse klei vormt de lens bij circa -0.9°C . De Zuidpolder klei vormt de ijslens bij ongeveer -0.3°C . De reden kan de doorlatendheid zijn. Hoe hoger de doorlatendheid, hoe lager de formatie temperatuur.

De foto's in Figuur 12 en Figuur 13 geven aan, dat er ook duidelijke structuurverschillen optreden tussen Boomse en Zuidpolderklei tijdens het bevriezen. De Boomse klei laat horizontale lenzen en scheurtjes zien, terwijl de Zuidpolderklei een onregelmatig patroon met ook verticale scheuren vertoont. Een theoretische verklaring is nog niet voorhanden; het is wel aannemelijk, dat het hogere watergehalte van de Zuidpolderklei een rol speelt. De scheurstructuur doet denken aan krimpscheurvorming bij drogen van klei.



Figuur 12 Ijslenzen in Boomse klei (BK2-4)



Figuur 13 Ijslens en scheuren in Zuid Polder klei (ZPK-1)

5. RELATIE GRONDSOORT EN VORSTHEFFING

5.1. VORSTGEVOELIGHEID

5.1.1. CLASSIFICATIE

Vorstgevoeligheid is een maat voor de uitzetting van bevroren grond bij natuurlijke en kunstmatige grondbevriezing. De vorstgevoeligheid van grondsoorten kan indicatief bepaald worden volgens ISSMFE (1989). Op basis van het grondtype en plasticiteit kan een inschatting van de mate van vorstheffing gekozen worden.

Tabel 13 geeft een samenvatting van verschillende classificatiesystemen zoals die internationaal gebruikt worden (ISSMFE, 1989). In deze tabel wordt de vorstgevoeligheid van verschillende grondsoorten geclassificeerd op basis van (1) algemene geomechanische eigenschappen (grondtype volgens UCSC, plasticiteit, vloeigrens en 'fines factor'), (2) segregatiepotentiaal SP en (3) vorstheffingssnelheid. Knutsson et al. (1985) vond een sterke relatie tussen deze segregatiepotentiaal en de fijne fractie ('fines factor' R_f): bij toename van de fractie klei en silt neemt de segregatiepotentiaal toe.

Tabel 13 Vorstgevoeligheid van verschillende grondsoorten (naar ISSMFE, 1989)

Vorst- gevoelig heid	Grond- type (USCS)	Plasticiteit			Fines factor	Segregatie- potentiaal	Vorstheffings- snelheid
		I_p	W_L [%]	I_L	R_f	SP_c [mm ² /hr.K]	ξ [mm/dag]
Verwaar- loosbaar	GW, GP SW, SP	< 1		≤ 0	< 2.5	< 0.5	< 0.5
Laag	CH	≥ 7	> 50	< 0.25	2.5-5	0.5-1.5	0.5-2
Matig	CI	≥ 7	35-50	0.25-0.5	5-10	1.5-3.0	2-4
	OH, MH	≥ 7	> 50				
Sterk	CL	≥ 7	< 35				
	ML	< 4	≤ 50	> 0.5	> 10	> 3.0	> 4
	OL	≥ 7	35-50				

GW	Goed-gegradeerd grind-zand mengsels (weinig tot geen fijne deeltjes)
GP	Slecht-gegradeerd grind en grind-zand mengsels (weinig tot geen fijne deeltjes)
SW	Goed-gegradeerd zand en grindhoudend zand (weinig tot geen fijne deeltjes)
SP	Slecht-gegradeerd zand en grindhoudend zand (weinig tot geen fijne deeltjes)
CH	Niet-organische klei van hoge plasticiteit, vette kleien
CI	Niet-organische klei van intermediaire plasticiteit
OH	Organische silten en organische siltige kleien met lage plasticiteit
MH	Niet-organische silten, mica- of diatomee-houdende fijne zanden of silten
CL	Niet-organische klei met lage en matige plasticiteit, gravel kleien, zandige kleien, siltige kleien
ML	Niet-organische silten, zeer fijne zanden, siltige of kleiige fijne zanden
OL	Organische silten en organische siltige kleien met lage plasticiteit

De ISSMFE richtlijn dient slechts kwalitatief gehanteerd te worden. De classificatie doet geen uitspraak over andere parameters zoals sterkte en elasticiteit. Wanneer 1-axiale of 3D-vriesexperimenten zijn uitgevoerd – waarbij de vorstheffing en -snelheid gemeten is – kan een meer betrouwbare en kwantitatieve inschatting gemaakt worden van vorstgevoeligheid.

5.1.2. IJSLENSFORMING EN GRONDSPANNINGEN

De groei van ijslenzen en de hierdoor opgebouwde grondspanningen (of 'heave pressures') is sterk afhankelijk van de gemiddelde korrelgrootte van een sediment. Dit wordt verklaard door de aangetoonde invloed van de grootte van de poriën op de 'heaving pressure'. Penner (1963) toonde experimenteel aan dat bij kleine diameter (20-50 µm) van de korrel grotere vriesspanningen ontstaan dan bij grote korreldiameter (60-100 µm), resp. 34 en 9,8 kPa. In grofkorrelige sedimenten (zoals zand) bevriest alleen het aanwezige water. Vorstspanningen als gevolg van ijslensvorming traden nauwelijks op (Czurda & Wagner, 1985).

Jessberger et al. (1990) toonde voor het ontwerp van de dwarsverbindingen in de Storebaelttunnel de relatie aan tussen de vriesspanning ('frostheave load') en de doorlatendheid van het sediment. Hoe lager de doorlatendheid, hoe hoger de vriesdruk gedurende de grondbevriezing. De vriesspanning in sedimenten met een doorlatendheid van $k = 10^{-9}$ m/s kan oplopen tot 1500 kPa (zie ook CUR-COB, 2002).

5.2. DE RELATIE INDEXPARAMETERS EN VORSTGEVOELIGHEID

De geomechanische indexparameters die bekend zijn van deze grondmonsters staan in Tabel 14 samengevat. In deze tabel staan de grondsoorten geïnclassificeerd volgens het USCS-systeem van Casagrande (SW = Sand/Well-graded, CH=Clay/High plasticity) en CL (Clay/Low plasticity). Op basis van de classificaties van USCS, ISSMFE en de resultaten van de vries testen kunnen van de geteste grondsoorten de vorstgevoeligheid geïnclassificeerd worden. De classificatie van vorstgevoeligheid volgens ISSMFE (1989) van de grondsoorten van dit onderzoek zijn in Tabel 15 aangegeven.

Tabel 14 Geotechnische eigenschappen van de proefmonsters.

Proefmonster	Geologische formatie	Lithologie	Grondtype	Plasticiteit		Volumiek gewicht	Watergehalte
		NEN 5104	(USCS)	I _L (%)	W _L (%)	γ [kN/m ³]	w [%]
Westerschelde zand (Z1)	Formatie van Naaldwijk / Laagpakket van Walcheren	zand	SW	-	-	15,5 (droog)	22,0
Klei van Boom (BK2)	Formatie van Rupel / Laagpakket van Boom	siltige klei	CH	51	76	19,3 (nat)	23,8
Zuidpolder klei	Formatie van Naaldwijk / Laagpakket van Wormer	siltige klei	CL	55	83	-	67,7
Hollandveen	Formatie van Nieuwkoop	veen	-	-	-	-	440,0

Tabel 15 Vorstheffingsnelheid en classificatie van vorstgevoeligheid van de proefmonsters.

proefmonster	geologische formatie	lithologie (grondtype USCS)	vorstheffing -snelheid ξ [mm / dag]	vorstgevoelig- heid ISSMFE, 1989; criterium: vorstheffing Tabel 5.1	vorstgevoelig- heid ISSMFE, 1989; criterium: grondtype Tabel 5.1
Westerschelde zand	Formatie van Naaldwijk / Laagpakket van Walcheren	los zand (SW)	0,0	verwaarloosbaar	verwaarloosbaar
Klei van Boom (BK2)	Formatie van Rupel Laagpakket van Boom	(stijve) siltige klei (CH)	0,27	verwaarloosbaar	laag
Zuidpolder klei	Formatie van Naaldwijk / Laagpakket van Wormer	(slappe) siltige klei (CL)	1,22	laag	sterk
Hollandveen	Formatie van Nieuwkoop	Veen (-)	0,47	Verwaarloosbaar tot laag	---

Wanneer er zowel gegevens over de vorstheffing h (of vorstheffingssnelheid ξ) als de grondsoort bekend zijn, kan een kwalitatieve schatting gemaakt worden van de vorstgevoeligheid. Voor twee verschillende criteria (vorstheffingssnelheid en grondsoort) is de classificatie verschillend (Tabel 15). De Zuidpolder klei wordt op basis van grondtype en karakteristieken als vorstgevoelig aangemerkt volgens ISSMFE (1999). De experimentele resultaten geven een lager vorstgevoeligheid aan. De Boomse klei is door de hoge plasticiteit minder gevoelig voor vorst en wordt als zodanig aangemerkt op basis van resultaten als op grondtype. Zowel het Westerschelde zand als het Hollandveen krijgen op basis van de lithologie en de lage vorstheffing de classificatie 'verwaarloosbaar tot laag' (Tabel 15).

5.3. VORSTHEFFING, VORSTGEVOELIGHEID EN VRIESSPANNINGEN

Konrad & Morgenstern (1980) beschrijven een eendimensionaal gronddeformatie model ('frostheave') dat suggereert dat na ijslensvorming de grond passief reageert met betrekking tot massa transport, maar dat water wordt getransporteerd in de richting van de ijslens. Het water beweegt zich dan van onbevoren grond door de dunne zone van (gedeeltelijk onbevoren) grond naar de ijslens. De krachten die hieruit resulteren vormen een zuigingspotentiaal ('suction') in de overgangszone (de 'fringe'). Bij eendimensionale grondbevriezing wordt een verband gevonden tussen de vorstheffing h en de temperatuurgradiënt, zie vergelijking 1. De uitzetting van grond gedurende bevriezing vindt plaats in de richting loodrecht op het vriesfront (de isothermen).

De segregatiepotentiaal SP die experimenteel bepaald wordt kan ook worden uitgedrukt als functie van de suctie bij de ijslens en het vriesfront (Andersland & Ladanyi, 1999):

$$SP = \frac{h_s - h_0}{T_s} \cdot k \quad (3)$$

h_s = suctie aan het lensoppervlak [m waterkolom]

h_0 = suctie aan het vriesfront [m waterkolom]

T_s = temperatuur bij de ijslens [$^{\circ}\text{C}$]

k = doorlatendheid [m/s]

Het effect van spanning op de segregatiepotentiaal SP kan als volgt worden berekend:

$$SP(p) = SP_0 \cdot e^{-a \cdot \sigma_n} \quad (4)$$

$SP(p)$ = segregatie potentiaal onder belasting σ_n

SP_0 = segregatie potentiaal zonder extra belasting

σ_n = gedefinieerd als spanning loodrecht op het vorstfront

a = grondparameter (Konrad & Morgenstern, 1984)

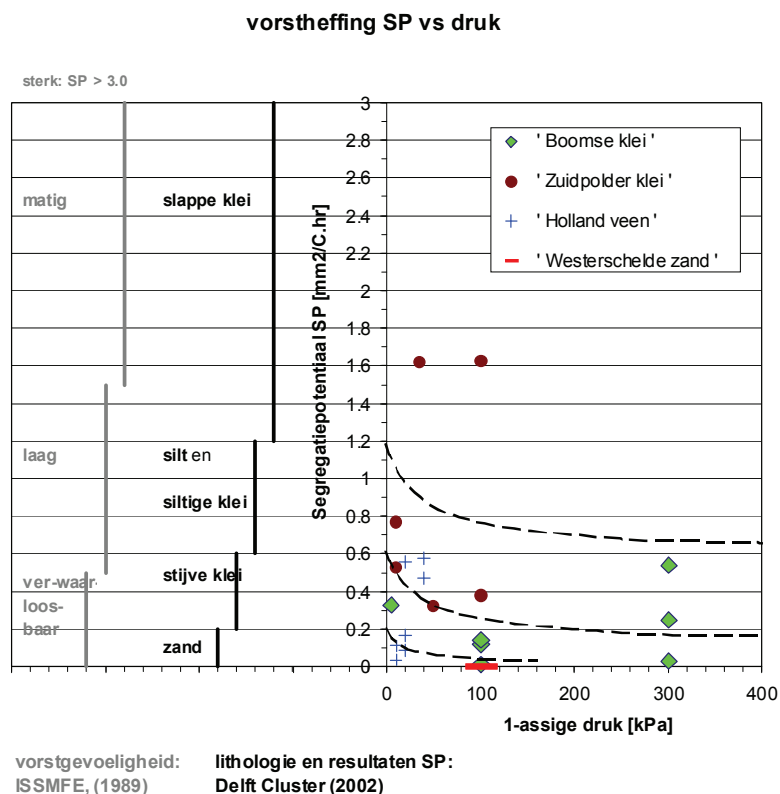
Tabel 16 Resultaten van vorstheffing en vorstgevoeligheid van de proefmonsters.

	Test nr.	Lithologie	Axiale druk [kPa]	SP [mm ² /C.hr]
Boomse klei	BK2-2	Klei, matig siltig	100	0.12
	BK2-3	Klei, matig siltig	100	0.14
	BK2-4	Klei, matig siltig	100	0.18
	BK2-5	Klei, matig siltig	300	0.03
	BK2-6	Klei, matig siltig	300	0.25
	BK2-7	Klei, matig siltig	5	0.55
	BK2-8	Klei, matig siltig	300	0.01
	BK2-8	Klei, matig siltig	300	0.01
Zuidpolder klei	ZPK-1	Klei, matig siltig	10	0.77
	ZPK-2	Klei, matig siltig	35	1.62
	ZPK-3	Klei, matig siltig	100	1.63
	ZPK-4	Klei, <i>sterk zandig</i>	100	0.38
	ZPK-5	Klei, <i>sterk zandig</i>	10	0.53
	ZPK-6	Klei, <i>sterk zandig</i>	50	0.32
Hollandveen	HV-1	Veen	10	0.04
	HV-2	Veen	20	0.09
	HV-3	Veen	40	0.0
	HV-4	Veen	40	0.47
	HV-5	Veen	20	0.56
	HV-6	Veen	40	0.58
	HV-7	Veen	20	0.17
	HV-8	Veen	10	0.11
Westerschelde zand	Z1-1	Zand	100	0
	Z1-2	Zand	100	0

5.4. ANALYSE VAN EXPERIMENTELE RESULTATEN

De experimentele relatie tussen spanning axiale druk (in een 1-dimensionale proefopstelling) en de segregatie potentiaal *SP* staat in Figuur 14 aangegeven. Sedimenten (met dezelfde korrelstructuur en watergehalte) vertonen bij hogere axiale druk een lagere segregatiepotentiaal (Konrad & Morgenstern, 1980; CUR-COB, 2002). Deze relatie staat met stippellijnen in Figuur 14 weergegeven.

De lithologie van de monsters van het onderzoek staat op de verticale as aangegeven. Ter vergelijking staat aan de linkerzijde van Figuur 14 (in grijs) de classificatie van vorstgevoeligheid op basis van de gemeten *SP* aangeven (volgens ISSMFE, 1989).



Figuur 14 Relatie vorstheffing SP - axiale druk: alle grondsoorten.

5.4.1. LAAGPAKKET VAN BOOM

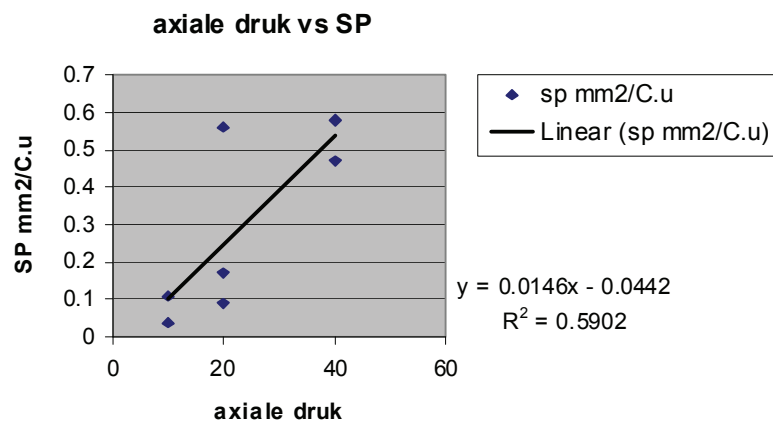
De zeven testresultaten van de 'Boomse Klei' hebben een spreiding in vorstheffing als gevolg van heterogene grondeigenschappen. De doorlatendheid, korrelgrootte en lithologie is in het gemonsterde bereik van de Klei van Boom groot (CUR-COB, 2002). De hoge SP waarde van 0,54 wordt verklaard door het siltige karakter van het monster. De overige waarden van SP zijn laag vergeleken met de Zuidpolder klei en Hollandveen.

5.4.2. ZUIDPOLDERKLEI

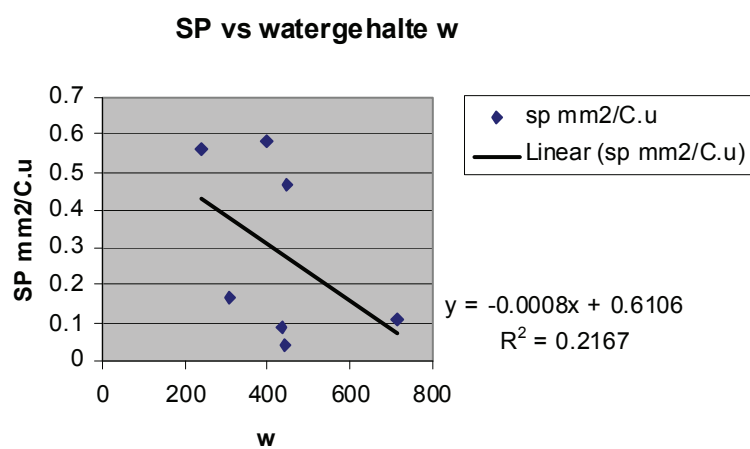
De SP van de Zuidpolderklei testen vertoont enige relatie met de korrelfractie $< 2 \mu\text{m}$. Ondanks de lage betrouwbaarheid van de relatie (door de grote spreiding en het kleine aantal proeven) kan worden geconcludeerd dat de monsters met een hoog kleigehalte hogere SP waarden vertonen. Twee SP resultaten hebben waarden iets boven 1,5 en zijn diensgevolge 'matig vorstgevoelig'.

5.4.3. HOLLANDVEEN

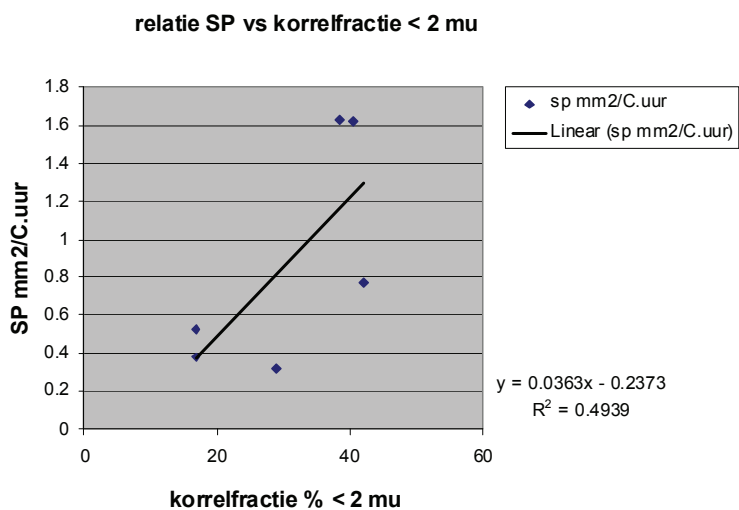
Hollandveen vertoont verschillend cryogeen gedrag in vergelijking met Klei van Boom of de Zuidpolder klei. In figuur 15 is te zien dat Hollandveen een hogere SP vertoont bij toenemende axiale spanningen. De geomechanische eigenschappen en structuur van Hollandveen verschillen sterk ten opzichte van die van zand of klei. Hollandveen bestaat voornamelijk uit water waardoor het aannemelijk is dat er totaal verschillende (cryogene) mechanismen werken dan de segregatiepotentiaal theorie van Konrad & Morgenstern aanneemt (1981). Het is daarom niet verwonderlijk dat veen een ander gedrag van vorstheffing laat zien.



Figuur 15 Hollandveen: relatie SP-axiale druk



Figuur 16 Hollandveen: relatie SP-watergehalte



Figuur 17 Hollandveen: relatie SP-korrelfractie <2µm

5.4.4. WESTERSCHELDE ZAND

De vriestesten van het zand vertonen verwaarloosbare vorstheffingen waardoor ook de SP praktisch nul is (Figuur 14). De lage vorstheffing wordt veroorzaakt door het zeer schone karakter van het zand en de hoge doorlatendheid.

5.5. CONCLUSIES

Op basis van de resultaten van de uitgevoerde vorstheffingsexperimenten kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- 1 de slappere kleisoort Zuidpolder Klei vertoont hogere vorstuitzetting dan de stijve, anisotrope Boomse klei;
- 2 het uitzettingsgedrag van bevroren veen vertoont een andere relatie tussen vorstheffing en de opgelegde spanning dan klei, silt en zand;
- 3 bevriezing van zand levert verwaarloosbare uitzettingen;
- 4 De ISSMFE-classificatie van vorstgevoeligheid komt redelijk overeen met de in dit onderzoek gebruikte grondsoorten en resultaten.

Hierbij kan worden aangetekend dat alle testen eenzijdig gedraineerd zijn uitgevoerd. Ongedraineerde proeven zullen hogere vorstuitzetting geven.

6. MODELLERING GRONDVRIEZEN

In dit hoofdstuk wordt verslag gedaan van de ontwikkeling en eerste toepassing van een eindige-elementenmodel voor grondvriezen.

- De inleiding in § 6.1 geeft een korte beschrijving van de eigenschappen en mogelijkheden van het model GeoFreeze 2.0.
- In § 6.2 worden eerst de experimentele resultaten geanalyseerd die zullen worden gebruikt bij de simulaties met het model.
- § 6.3 beschrijft de theorie achter het model.
- § 6.4 toont de resultaten van de vergelijking tussen modelsimulaties en proeven voor zand en klei.
- § 6.5 geeft een overzicht van conclusies en aanbevelingen.

6.1. INLEIDING

Het ontwikkelde model GeoFreeze 2.0 kan worden gezien als een uitbreiding en verbetering van de eerste aanzet uit 1999 [Rijkers 1999]. De verdere ontwikkeling binnen het Delft Cluster gedeelte van het praktijkonderzoek F100 is uitgevoerd door GeoDelft, met behulp van het EEM programma Diana. Resultaat van het onderzoek is een software prototype dat zeer goed geschikt blijkt om de resultaten uit 1-D vriesproeven op klei en zand te simuleren.

Een analyse met het vriesmodel wordt uitgevoerd in twee stappen. Stap 1 is de bepaling van de tijdsafhankelijke temperatuursverdeling. Stap 2 is de bepaling van de tijdsafhankelijke spanningen, stroming en vervorming bij de gegeven temperatuursverdeling.

6.1.1. MOGELIJKHEDEN EN BEPERKINGEN

De voornaamste mogelijkheden en beperkingen van het prototype zijn:

- Het model is geschikt voor tweedimensionale, axiaal-symmetrische en driedimensionale geometrie. Alle relevante randvoorwaarden voor spanningen, vervormingen en stroming kunnen worden toegepast.
- Gedurende de temperatuursberekening wordt de invloed van grondwaterstroming verwaarloosd. De latente warmte bij de overgang van water naar ijs en omgekeerd en de invloed van temperatuur op geleiding en capaciteit wordt wel in rekening gebracht.
- Bij de berekening van spanning en vervorming wordt rekening gehouden met het uitzetten van water door bevriezen en met continue aangroei van ijslenzen gedurende vriezen (*cryosuction*).
- Bij de berekening van spanningen kan naast een temperatuurafhankelijke stijfheid ook de invloed van kruip en sterkte in rekening worden gebracht.
- Bij de berekening van spanning en vervorming kan de gebruiker kiezen of ook de gekoppelde waterdrukken en –stroming moeten worden berekend. Wanneer waterdrukken niet worden berekend vindt aangroei van ijslenzen en uitdrijven van water plaats onder aanname van volledige drainage.

- Bij verhinderde vervorming ontstaat door ijslensvorming spanningsverhoging in de omgeving. De effecten van vriesprocessen op de krachtswerking in bijvoorbeeld tunnels kunnen daarmee in theorie worden bepaald. De voorspellende waarde van dergelijke berekeningen is op grond van de beschikbare 1D proefresultaten echter nog niet aantoonbaar.
- Naast de invloed van vriezen wordt ook de invloed van dooien in rekening gebracht. De voorspellende kwaliteit van de dooibeschrijving is echter nog niet onderzocht.

6.1.2. MATERIAALPARAMETERS

Alle materiaalparameters zijn direct uit standaardproeven te bepalen. Naast gangbare parameters als porositeit, gewicht, geleiding, capaciteit/latente warmte, doorlatendheid en stijfheid (de laatste vier als functie van temperatuur) zijn de volgende parameters met name bepalend voor de door bevroren gegenereerde spanningen, vervormingen en stroming:

- de temperatuursafhankelijke uitzetting bij overgang van poriënwater naar ijs;
- de spanningsafhankelijke *Segregation Potential*, zoals geformuleerd door Konrad en Morgenstern [Konrad 1994].

6.2. EXPERIMENTELE RESULTATEN

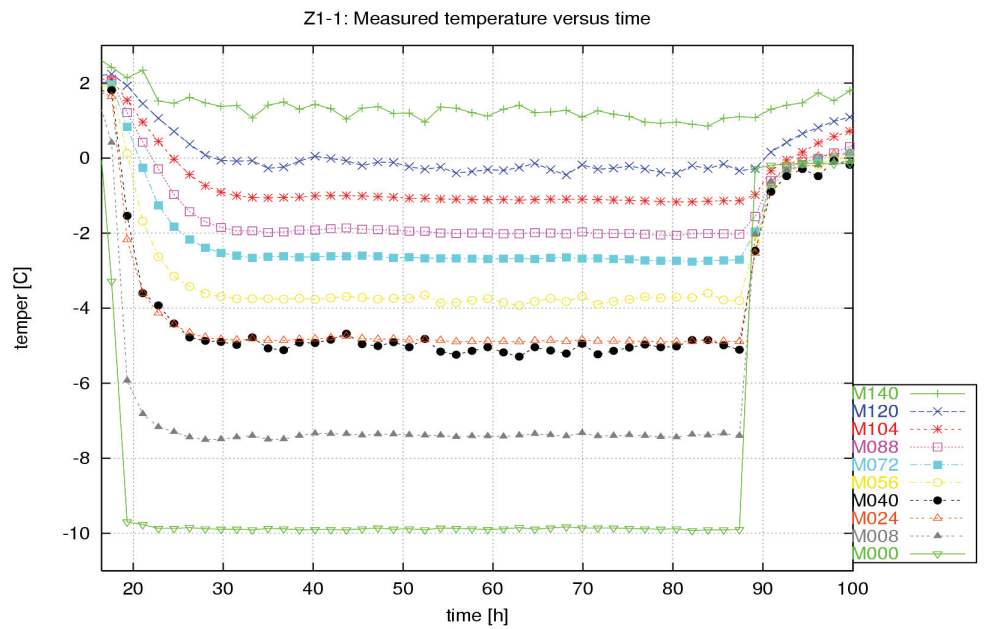
De uitgevoerde modelsimulaties zijn gebaseerd op de experimenten BK2-4 (Boomse Klei) en Z1-1 (Westerschelde Zand). Vooruitlopend op de vergelijking met de simulaties worden de resultaten van deze testen zelf eerst kort geanalyseerd.

Tabel 17 geeft de materiaalparameters zoals bepaald voor deze monsters. De temperaturen zijn gemeten aan de zijkant van het monster, behalve de temperaturen van de onderplaat en bovenplaat. Het getal in de legenda geeft de afstand in millimeters tot de onderplaat.

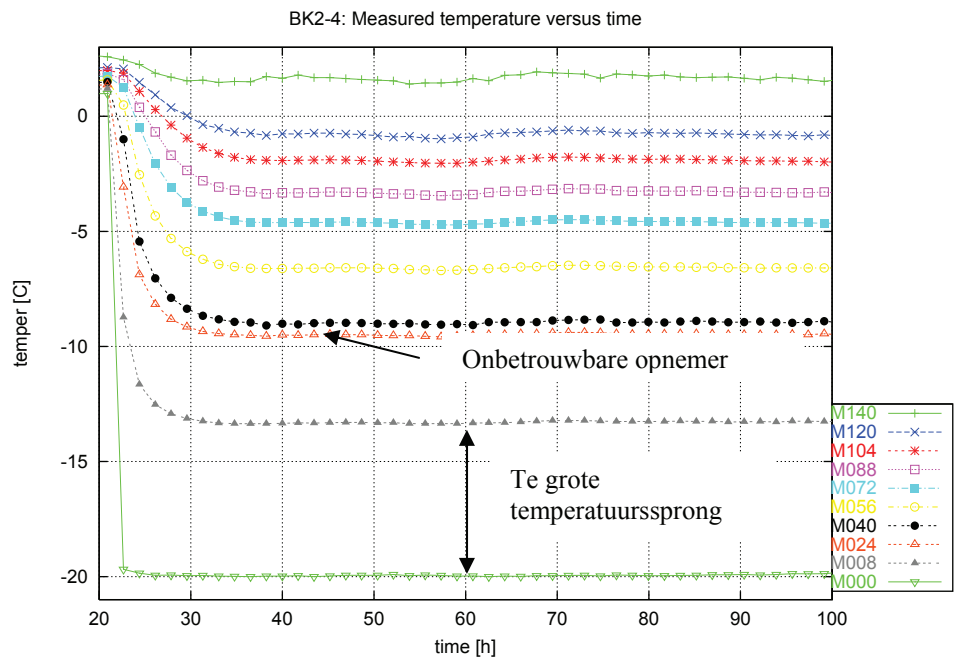
Tabel 17 Parameters WST zand Z1 en Boomse Klei BK2

grondparameter		Z1	BK2
droge dichtheid	[kg/m ³]	1580	1550
porositeit	[%]	34,4	38,0
geleiding onbevoren	[kgm/Ks ³]	1,95	1,33
geleiding bevroren	[kgm/Ks ³]	3,44	2,41
capaciteit onbevoren	[kJ/m ³ K x10 ³]	3,03	3,09
capaciteit bevroren	[kJ/m ³ K x10 ³]	2,18	2,20

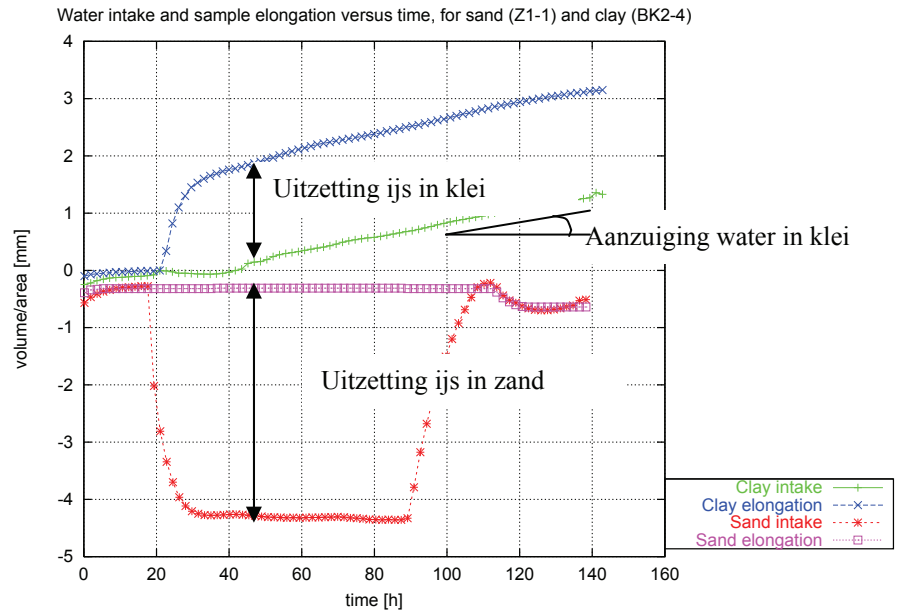
Figuur 18 en Figuur 19 geven de gemeten temperaturen op verschillende hoogtes langs de wand van het grondmonster voor respectievelijk zand en klei. Figuur 20 geeft de gemeten verlenging en waterinname voor zand en klei.



Figuur 18 Z1-1: Gemeten temperatuur, van onder (M000) tot boven (M140)



Figuur 19 BK2-4: Gemeten temperatuur, van onder (M000) tot boven (M140)



Figuur 20 Z1-1 en BK2-4: Gemeten verlenging en waterinname

Bestudering van de gemeten temperaturen laat zien dat de temperatuuropmeter Mo24 onbetrouwbaar is. Verder is de temperatuursprong tussen Mo00 en Mo08 veel groter dan mag worden verwacht bij een geleiding die onder bevroren condities alleen in de grond plaatsvindt. Blijkbaar werkt de overgang van bodemplaat naar monster als een extra warmteweerstand. Bij de simulaties is daarom aangenomen dat de werkelijke temperatuur van de onderkant van het proefstuk hoger zal zijn dan de gemeten temperatuur in de bodemplaat.

De waterinname en verlenging zoals getoond in Figuur 20 laten allereerst zien dat in *klei* aanzuiging van water optreedt door ijslensvorming. Het aangezogen volume leidt volledig tot verlenging van het proefstuk.

Het uitzetten van ijs door bevroren leidt in *zand* volledig tot uitdrijven van poriënwater.

Opvallend is dat het poriënwater in klei veel minder uitzet dan in zand.

Voor een schatting van de fractie onbevroren water wordt doorgaans de relatie van Jessberger en Jagow-Klaff toegepast, zie vergelijking (5):

$$W_u = A|T|^B, (T < 0^\circ\text{C}) \quad (5)$$

met:

T = de temperatuur [$^\circ\text{C}$]

W_u = de fractie onbevroren water

A, B = materiaalparameters

Bij de A en B waarden in tabel 18 volgens de rapportage van meetresultaten [TNO 2001] is in geval van klei 95 % bevroren bij $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, terwijl dat bij zand al bij $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ het geval is. Bij de gemeten temperatuursverdelingen en de aangenomen porositeit zou in klei dan een uitzetting moeten worden gevonden die slechts weinig minder is dan die bij zand, zolang we aannemen dat de volumetoename door bevroren bij verhinderde laterale vervorming uitsluitend leidt tot verlenging van het proefstuk. Daarom is bij de numerieke simulaties aangenomen dat de fractie onbevroren water in klei bij lagere temperaturen groter is dan volgens de genoemde rapportage het geval zou zijn.

Tabel 18 Jessberger parameters volgens F100 rapportage

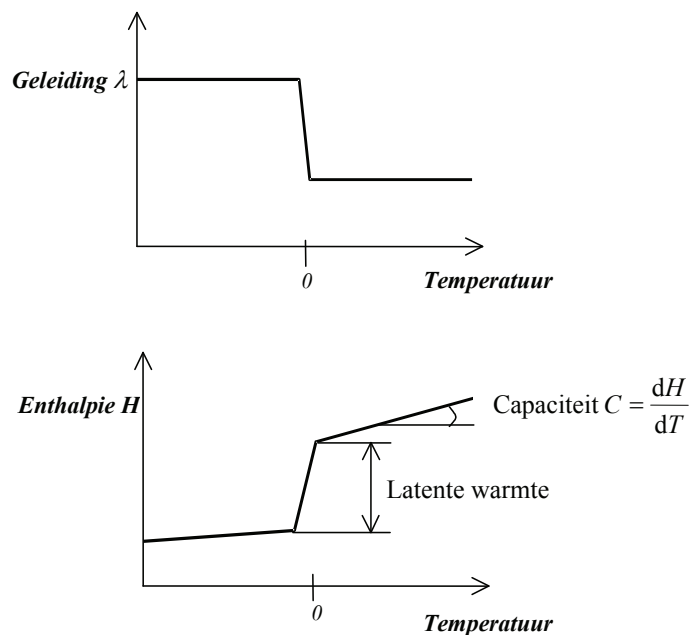
Grondsoort	A	B
Zand	0.05037	-0.591
klei	0.08977	-
		0.400

6.3. THEORIE

Een analyse met het vriesmodel wordt uitgevoerd in twee stappen. Stap 1 is de bepaling van de tijdsafhankelijke temperatuursverdeling. Stap 2 is de bepaling van de tijdsafhankelijke spanningen, stroming en vervorming bij de gegeven temperatuursverdeling.

6.3.1. TIJDSAFHANKELIJKE TEMPERATUURS-VERDELING (STAP 1)

De tijdsafhankelijke temperatuursverdeling wordt bepaald met behulp van een standaard Diana berekening [DIANA 1988a]. De geleiding λ en enthalpie H zijn door de gebruiker op te geven functies van temperatuur. Via de enthalpie worden zowel de capaciteit van bevroren en onbevroren grond als de latente warmte bij de overgangen tussen water en ijs vastgelegd, zie Figuur 21.



Figuur 21 Geleiding en enthalpie als functie van temperatuur

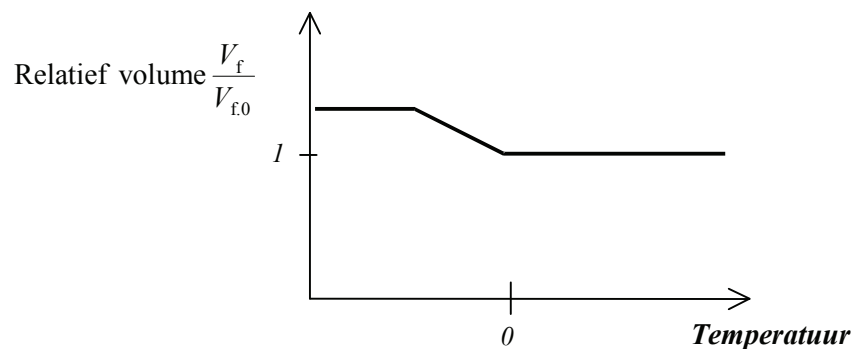
6.3.2. TIJDSAFHANKELIJKE SPANNINGEN, STROMING EN VERVORMING (STAP 2)

Een standaard Diana berekening is al geschikt voor de bepaling van spanningen en vervormingen, al dan niet gekoppeld met stroming en consolidatie [DIANA 1988a], [DIANA 1988c]. Voor de effecten van het uitzetten van poriënwater door bevriezen en het aanzuigen van water bij gegeven tijdsafhankelijke temperatuursverdeling is in dat deel van Diana een prototype uitbreiding uitgevoerd.

UITZETTING DOOR BEVRIEZEN, KRIMP DOOR DOOIEN

De gebruiker kan het relatieve volume van het water/ijs mengsel in de poriën ten opzichte van het volume bij 0 °C opgeven als functie van temperatuur, zie Figuur 22.

De uitzetting van het water wordt binnen het stromingsdeel beschreven door een verdeelde bronterm voor de Darcy flux q .



Figuur 22 Relatief volume water en ijs als functie van temperatuur

$$\text{div}(\mathbf{q}) = \frac{n}{V_{f,0}} \frac{dV_f}{dT} \frac{dT}{dt} \quad (6)$$

met:

q = de Darcy flux;

n = de porositeit;

V_f = het volume van een eenheidsgewicht water/ijs mengsel bij de actuele temperatuur;

$V_{f,0}$ = het volume van een eenheidsgewicht water bij de initiële temperatuur;

T = de temperatuur

t = de tijd.

Ijs neemt 9 % meer volume in dan water. Aanvullend is dus nog een aanname nodig voor de temperatuurafhankelijke fractie ijs in een bepaalde grondsoort bij een bepaalde druk (zie 5).

De bronterm leidt bij goed gedraineerd zand vrijwel volledig tot uitdrijving van water. Bij slecht doorlatende grond als klei daarentegen leidt de bronterm vooral tot uitzetting van de grond, vanwege ijslensvorming. Het gedeelte van de wateruitzetting dat leidt tot uitzetting van de grond wordt in het spanningsdeel verdisconteerd via de factor $f_{\text{uitzetting}}$.

$$\frac{d\varepsilon_{\text{vol}}}{dt} = f_{\text{uitzetting}} \frac{n}{V_{f,0}} \frac{dV_f}{dt} \quad (7)$$

met:

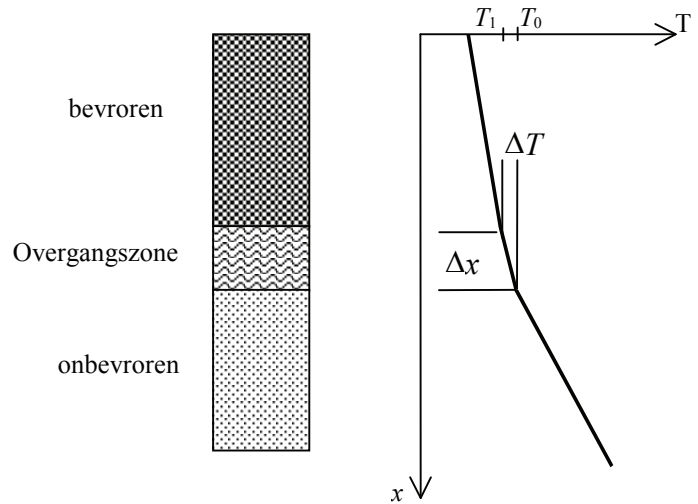
ε_{vol} = de volumerek;

$f_{\text{uitzetting}}$ = een op te geven factor tussen 0 en 1. Bij gedraineerd zand is de factor 0. Bij klei nadert de factor tot 1.

Evenals bij aanzuiging (zie hierna) wordt in het model aangenomen dat de richting van de volumerek gelijk is aan de richting van de temperatuursgradiënt. Deze aanname is overigens alleen geschikt zolang de uitzetting in die richting relatief makkelijk kan plaats vinden in vergelijking tot uitzetting in de laterale richting.

STATIONAIRE IJSLENSFORMING TIJDENS BEVRIEZING

Bij slecht doorlatende grondsoorten blijkt in de overgangszone tussen bevroren en onbevoren grond ook bij een stationaire temperatuursverdeling nog aangroei van de ijslenzen op te treden. Deze aangroei leidt tot aanzuiging van water. (zie figuur 23).



Figuur 23 Ijslensvorming in overgangszone tussen bevroren en onbevoren grond

Om de stationaire volumeaangroei en daarmee gepaard gaande aanzuiging te modelleren is in het model gebruik gemaakt van de bekende empirische relatie van Konrad en Morgenstern [Konrad, 1994]. Deze relatie legt een lineair verband tussen de snelheid van aangroei en de temperatuursgradiënt in de overgangszone. Daarbij wordt rekening gehouden met de beperkende invloed van de gronddruk in de richting van de temperatuursgradiënt. Bij aanname van een constante volumerek in het overgangsgebied kan de vergelijking worden omschreven tot vergelijking (8).

$$\frac{d\varepsilon_{\text{vol}}}{dt} \Delta x = SP_0 e^{-a\sigma_n} |\text{grad}(T)| \quad (8)$$

met:

Δx = De dikte van de overgangszone, zie Figuur 23

SP_0 = De segregation potential bij normaalspanning nul

a = Materiaalparameter

σ_n = De normaalspanning in de richting van de temperatuursgradiënt

Wanneer de temperatuurgrenzen van het overgangsgedebied zijn vastgelegd als T_0 en T_1 , dan kan de dikte van de overgangszone bij een bekende gradiënt worden geschat met behulp van vergelijking (9).

$$\Delta x = \frac{(T_0 - T_1)}{|\text{grad}(T)|} \quad (9)$$

Combinatie van vergelijking (9) en (10) leidt tot de in het spanningsdeel gebruikte uitdrukking voor de volumerek door aangroei van ijslenzen in de overgangszone:

$$\frac{d\varepsilon_{\text{vol}}}{dt} = SP_0 e^{-a\sigma_n} \frac{|\text{grad}(T)|^2}{(T_0 - T_1)} \quad (10)$$

De volumerek treedt op in de richting van de temperatuursgradiënt.

Het deel van de volumerek dat vrij kan optreden veroorzaakt automatisch aanzuiging van water en vervorming. Het eventueel verhinderde deel van de volumerek leidt automatisch tot spanningsopbouw. Deze spanningen leiden via de spanningsafhankelijkheid in vergelijking (10) weer tot reductie van verdere volumerek.

De generatie van volumerek door ijslensvorming stopt zodra de temperatuur stijgt. De in ijslenzen geaccumuleerde volumerek wordt geleidelijk vrijgegeven zodra de temperatuur boven de ondergrens T_1 van de overgangszone geraakt, zie vergelijking (11):

dooi:

$$\frac{d\varepsilon_{\text{vol}}}{dt} = \frac{\varepsilon_{\text{vol}}}{(T - T_0)} \frac{dT}{dt} \quad (11)$$

TEMPERATUURAFHANKELIJKE STIJFHEID EN PERMEABILITEIT

De stijfheid E en permeabiliteit k zijn weer door de gebruiker op te geven functies van temperatuur.

OVERZICHT INVOERPARAMETERS

Samengevat ziet de totale set materiaalparameters voor een vriesberekening er als volgt uit:

Temperatuursberekening:

$\lambda(T)$ Een puntsgewijze grafiek van de geleiding als functie van temperatuur. Zie Figuur 21.

$H(T)$ Een puntsgewijze grafiek van de enthalpie als functie van temperatuur. Hiermee worden feitelijk de temperatuursafhankelijke warmtecapaciteit en latente warmte vastgelegd. Zie Figuur 21

Vervormingsberekening:

$E(T)$ Een puntsgewijze grafiek van de E-modulus als functie van temperatuur

ν De dwarscontractiecoëfficiënt

n De porositeit

ρ Het soortelijk gewicht

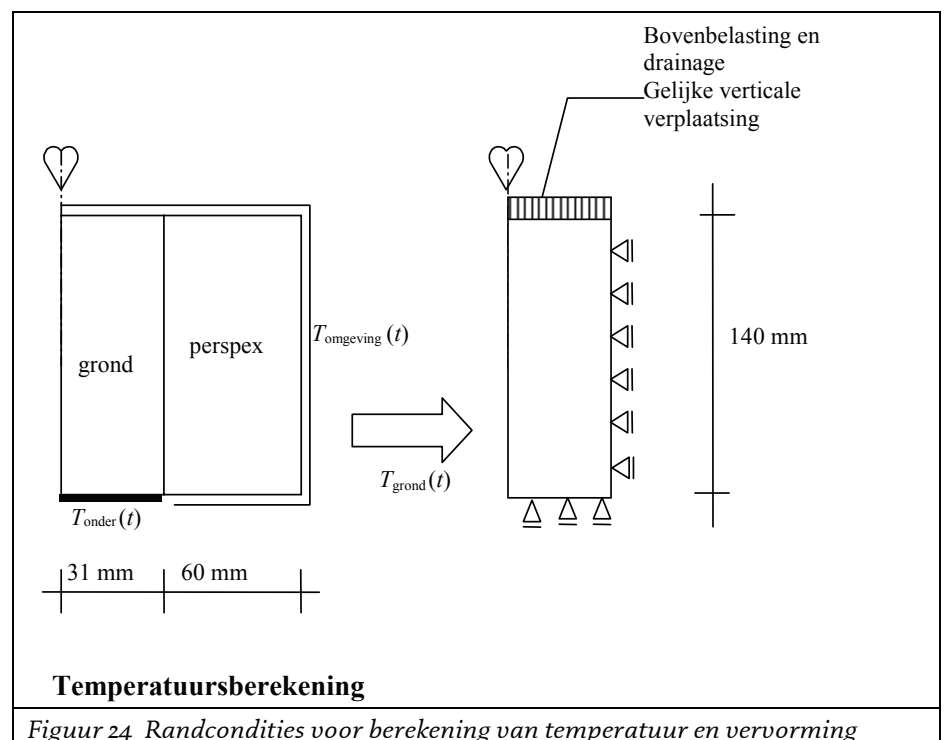
$\frac{V_f}{V_{f,0}}(T)$	Een puntsgewijze grafiek van het relatieve volume van een water/ijs mengsel versus de temperatuur (alleen nodig bij imperfecte drainage). Zie Figuur 22.
k	De Darcy permeabiliteit, isotroop of anisotroop. Alleen nodig bij imperfecte drainage.
$f_{\text{uitzetting}}$	Een factor tussen 0 en 1, die aangeeft welk deel van de volumeverandering bij bevriezen van poriënwater wordt opgenomen in ijslenzen en poriën. Alleen voor klei. Zie vergelijking (7).
$SP_{0, a}$	De Konrad en Morgenstern parameters. Alleen voor klei. Zie vergelijking (10).
T_0, T_1	Temperaturen bij start en eind van de overgangszone tussen onbevoren en bevroren grond. Alleen voor klei. Zie Figuur 23.

6.4. SIMULATIES

Na de beschrijving van het elementennet en de randvoorwaarden worden de invoer en resultaten voor de simulaties van de vriesproeven op zand (Z1-1) en klei (BK2-4) gepresenteerd.

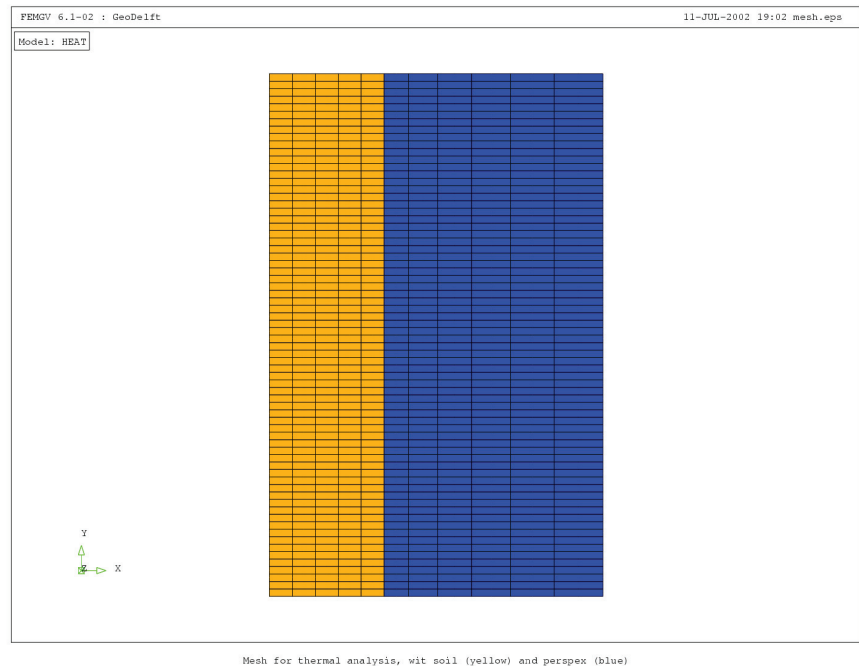
6.4.1. ELEMENTENNET EN RANDVOORWAARDEN

Voor de simulatie van de experimenten is gebruik gemaakt van axiaal-symmetrische schematisatie. In de temperatuursberekening is naast de grond ook de perspex cilinderwand gemodelleerd. Zie Figuur 24 voor een overzicht van de toegepaste randcondities.



Het toegepaste elementennet voor de temperatuursberekening wordt getoond in Figuur 25. Over de hoogte zijn 70 vierhoekige elementen toegepast. De halve diameter van het grondmonster (oranje in Figuur 25) is gemodelleerd met 5 elementen. Over de dikte van de perspex cilinderwand (blauw in Figuur 25) zijn 6 elementen toegepast. De perspexwand is niet meegenomen in de vervormingberekening.

De toegepaste vierhoekige elementen hebben in de temperatuursberekening 4 knopen, en in de vervormingberekening 8 knopen.



Figuur 25 Elementennet voor de temperatuursverdeling, met grond en perspex

6.4.2. INVOER EN RESULTATEN ZAND Z1-1

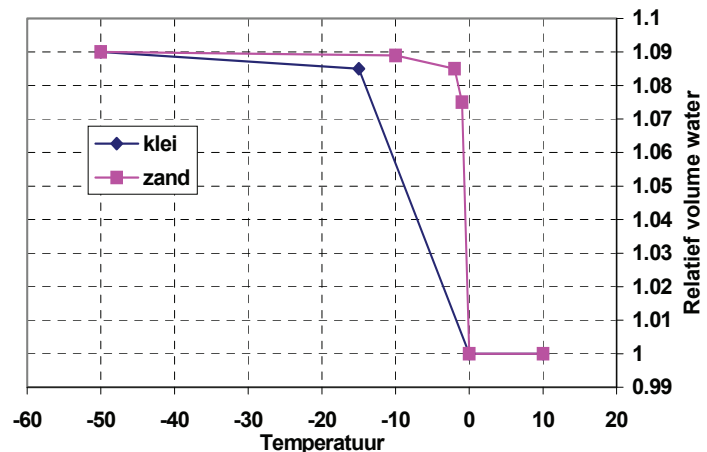
Een overzicht van de belangrijkste modelinvoer wordt gegeven in Tabel 19. De toegepaste temperatuursafhankelijke geleiding en capaciteit is gebaseerd Tabel 17. De latente warmte benodigd voor de overgang van poriënwater naar ijs is bepaald door vermenigvuldiging van de latente warmte van water (338 kJ/kg) met de porositeit uit Tabel 17.

Tabel 19 Invoerparameters zand Z1-1

Temperatuursberekening [mm, C, s]							
$\lambda_{\text{zand}}(T)$	T	≤ -1	≥ 0				
	λ	0.00344	0.00195				
$H_{\text{zand}}(T)$	H	-100	-1	0	100		
	T	0	0.22	0.33	0.63		
λ_{perspex}	0.0002						
C_{perspex}	0.00177						
T_{onder}	-8.5 (in plaats van -10)						
Vervormingsberekening [m, kN, s]							
$E(T)$	T		≤ -1	≥ 0			
	E (willekeurig gekozen)		10^6	$5 \cdot 10^4$			
ν	0.3 (willekeurig gekozen)						
n	0.34						
$\frac{V_f}{V_{f.0}}(T)$	T	-50	-10	-2	-1	0	100
	$\frac{V_f}{V_{f.0}}$	1.09	1.089	1.085	1.075	1	1
$K(T)$	$T_{f.0}$	≤ -1	≥ 0				
	k	$0.0125 \cdot 10^{-6}$		$2.5 \cdot 10^{-6}$			

De temperatuurafhankelijke stijfheid en permeabiliteit van de onbevroren en bevroren grond zijn arbitrair gekozen. Omdat het grondmonster vrij kan uitzetten beïnvloedt de stijfheid in combinatie met de permeabiliteit in deze simulatie namelijk alleen de snelheid waarmee consolidatie plaatsvindt.

De hoeveelheid uitgedreven water wordt geheel bepaald door de ingevoerde porositeit n en de het relatieve volume van het water/ijs mengsel als functie van temperatuur. Voor de laatste relatie is proberenderwijs een eenvoudige grafiek bepaald die ongeveer resulteert in de hoeveelheid uitzetting die tijdens het experiment is waargenomen. De gehanteerde grafiek is redelijk vergelijkbaar met de relatie zoals gegeven in § 6.2, zie Figuur 26.

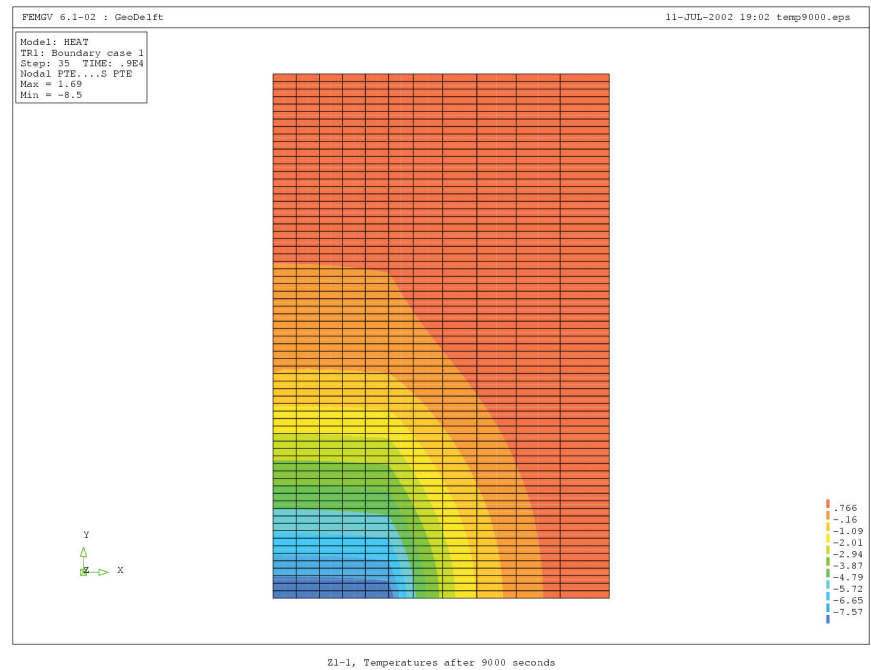


Figuur 26 Z1-1 en BK2-4 - Aangenomen relatief volume versus temperatuur

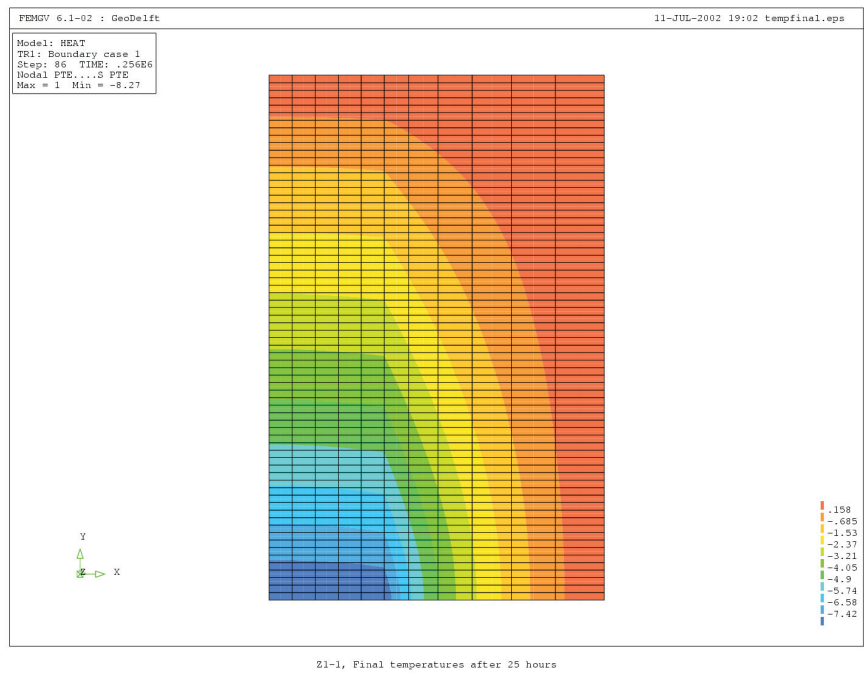
Uit Figuur 28 blijkt nabij de onderkant de temperatuur in het midden van het grondmonster een fractie hoger te zijn dan de temperatuur bij de wand.

Uit Figuur 30 en figuur 31 blijkt dat bij de gewijzigde aanname voor de temperatuur van de onderkant van de grond een goede voorspelling voor de tijdsafhankelijke temperatuursontwikkeling ter plaatse van de opnemers kan worden gedaan.

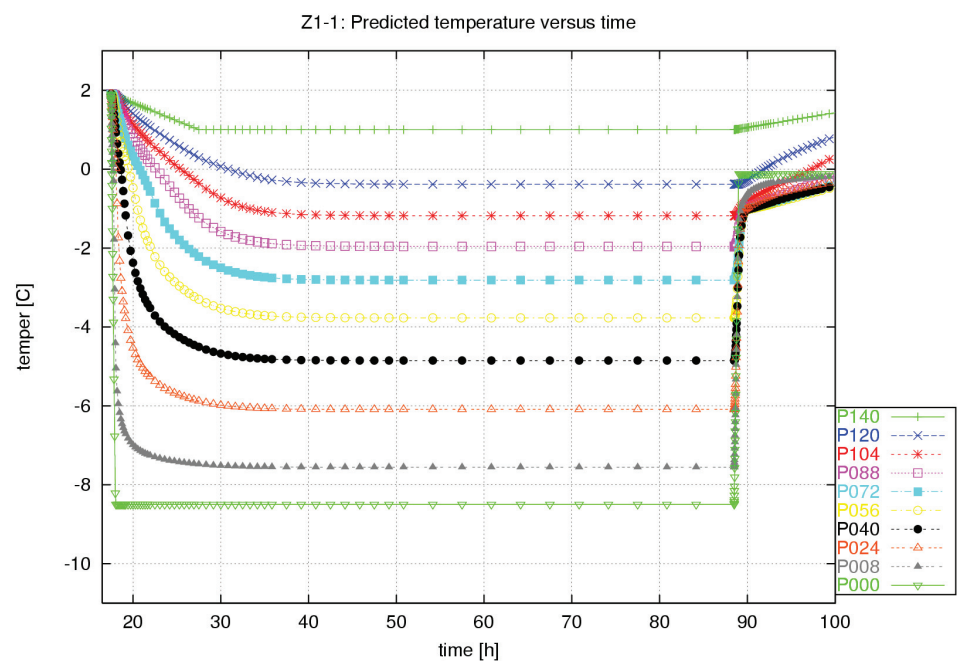
Uit Figuur 32 blijkt dat het uitdrijven van water tijdens bevriezen en het weer aanzuigen tijdens ontdooien ook goed kan worden gesimuleerd zodra een geschikte aanname voor de temperatuursafhankelijke volumeverandering door bevriezen van water wordt gebruikt.



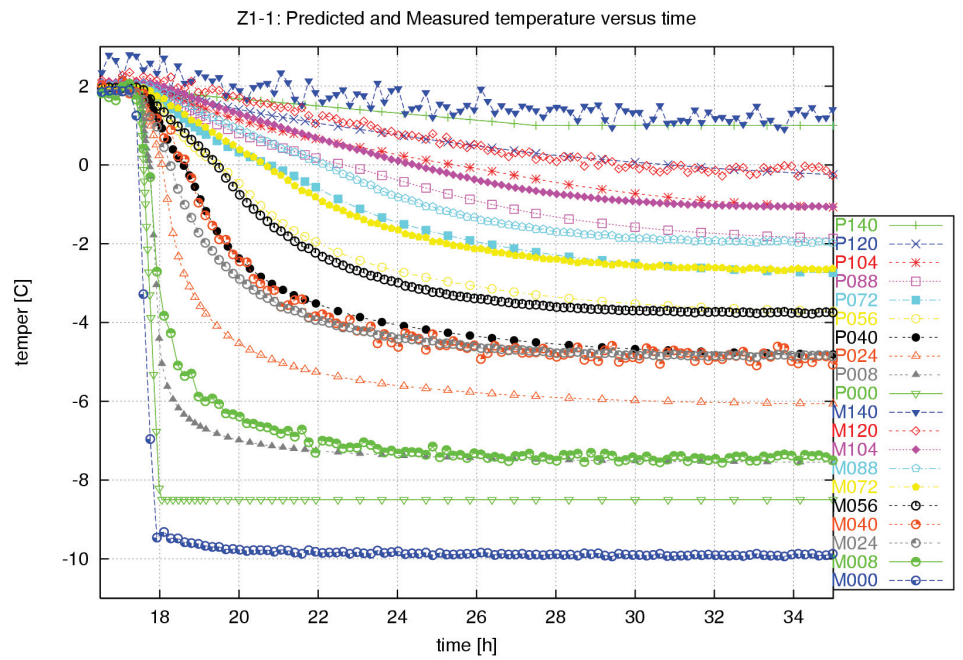
Figuur 27 Z1-1: Temperatuursverdeling 9000 seconden na start vriezen



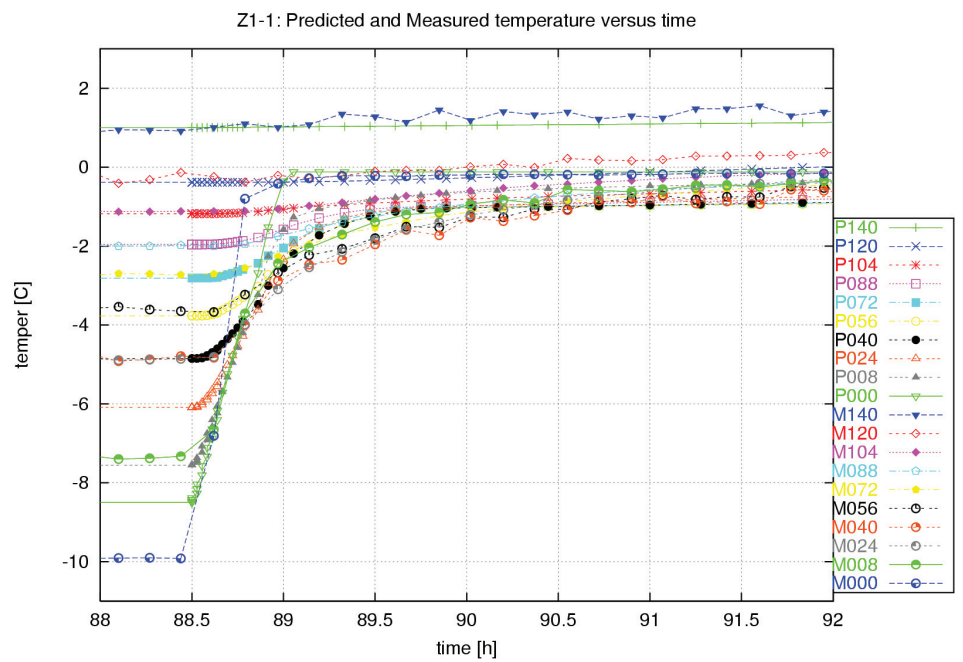
Figuur 28 Z1-1: Temperatuursverdeling gedurende stationair vriezen



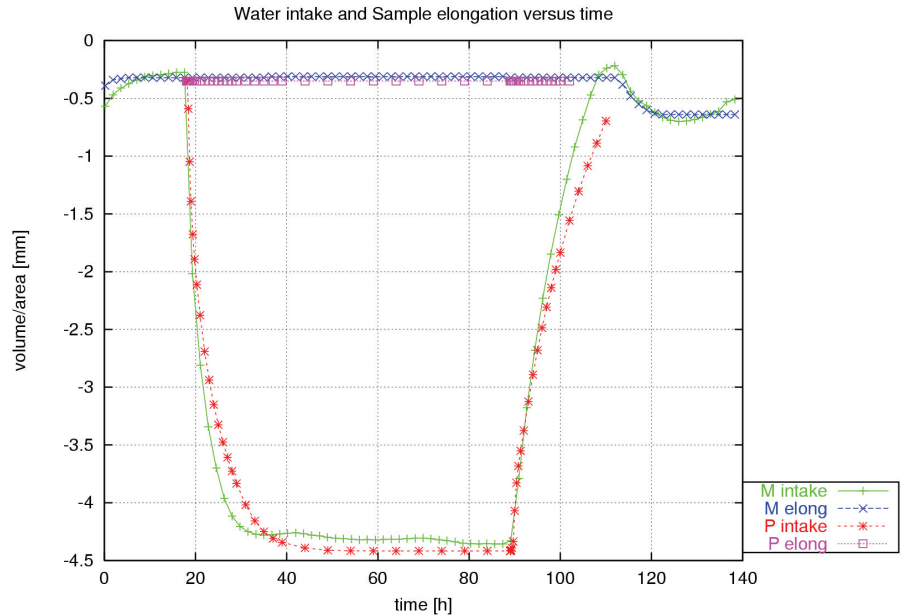
Figuur 29 Z1-1: Voorspelde temperatuursontwikkeling ter plaatse opnemers



Figuur 30 Z1-1: Vergelijking voorspelde en gemeten temperaturen (start vriezen)



Figuur 31 Z1-1 Vergelijking voorspelde en gemeten temperaturen (einde vriezen)



Figuur 32 Z1-1: Vergelijking voorspelde en gemeten verplaatsing en aanzuiging. M-intake = gemeten inname, M-elong = gemeten verlenging, P-intake = voorspelde inname, P-elong = voorspelde verlenging.

6.4.3. KLEI BK2-4

Een overzicht van de belangrijkste invoer wordt gegeven in Tabel 20. Voor het relatieve volume van het water/ijs mengsel als functie van temperatuur is weer proberenderwijs een relatie gevonden die resulteert in de hoeveelheid uitzetting die ook in het experiment is geconstateerd (Figuur 26). De waarde van de *segregation potential* SP is bepaald uit de gemeten helling van de aanzuiging en de gemeten temperatuursgradiënt in de aangenomen overgangszone. Omdat wordt aangenomen dat het proefstuk vrij kan uitzetten hoeft geen rekening te worden gehouden met spanningsafhankelijkheid.

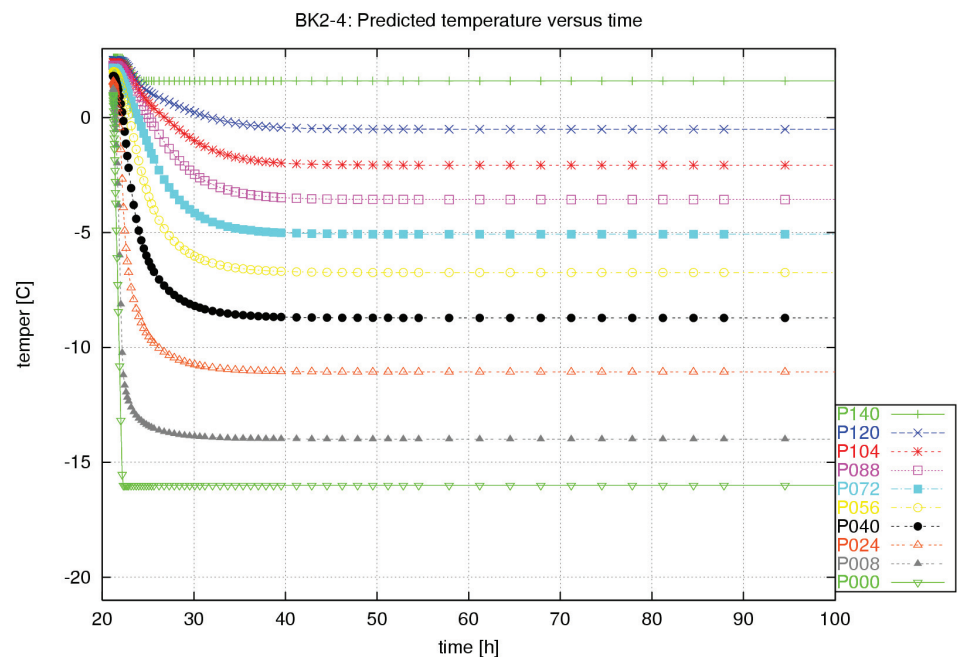
Tabel 20 Invoerparameters Boomse Klei BK2-4

Temperatuursberekening [mm, C, s]					
$\lambda_{\text{klei}}(T)$	T	≤ -1		≥ 0	
	λ	0.00242		0.00137	
$H_{\text{klei}}(T)$	T	-100	-5	0	100
	H	0	0.22	0.36	0.65
λ_{perspex}	0.0002				
C_{perspex}	0.00177				
T_{onder}	-16 (in plaats van -20)				

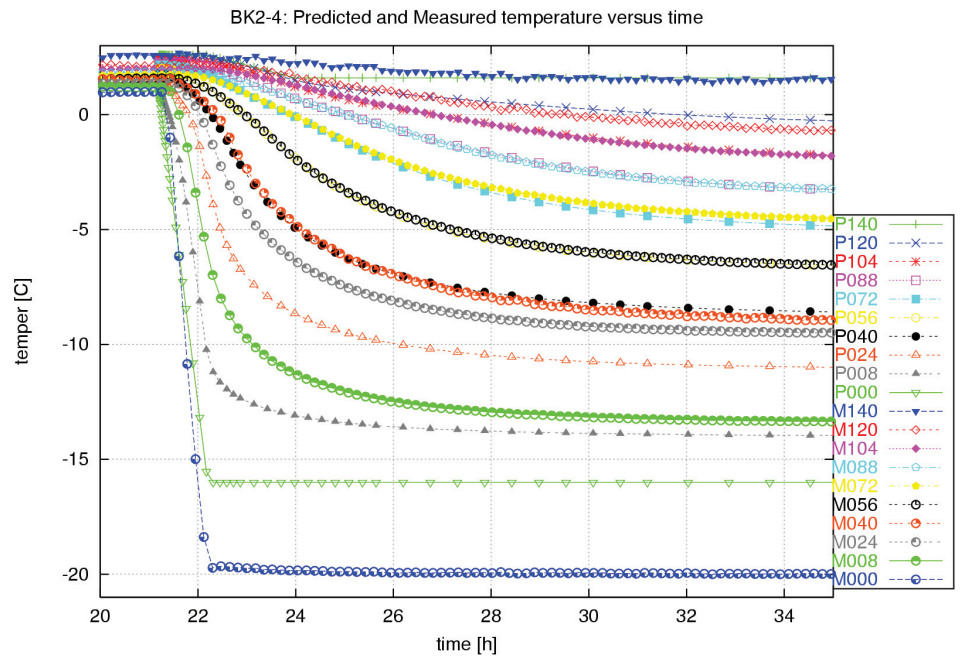
Vervormingsberekening [m, kN, C, s]					
$E(T)$	T		$T \leq -15$		$T \geq 0$
	E (willekeurig gekozen)		10^6		$5 \cdot 10^4$
ν	0.3 (willekeurig gekozen)				
n	0.38				
$\frac{V_f}{V_{f.0}}(T)$	T	-50	-15	0	100

	$\frac{V_f}{V_{f,0}}$	1.09	1.085	1.00	1.00		
$k(T)$	T				≤ -15	≥ 0	
	k				$0.0125 \cdot 10^{-8}$	$2.5 \cdot 10^{-8}$	
$f_{uitzetting}$	0.82						
SP_o, a	400, 0						
T_o, T_i	-0.5, -5						

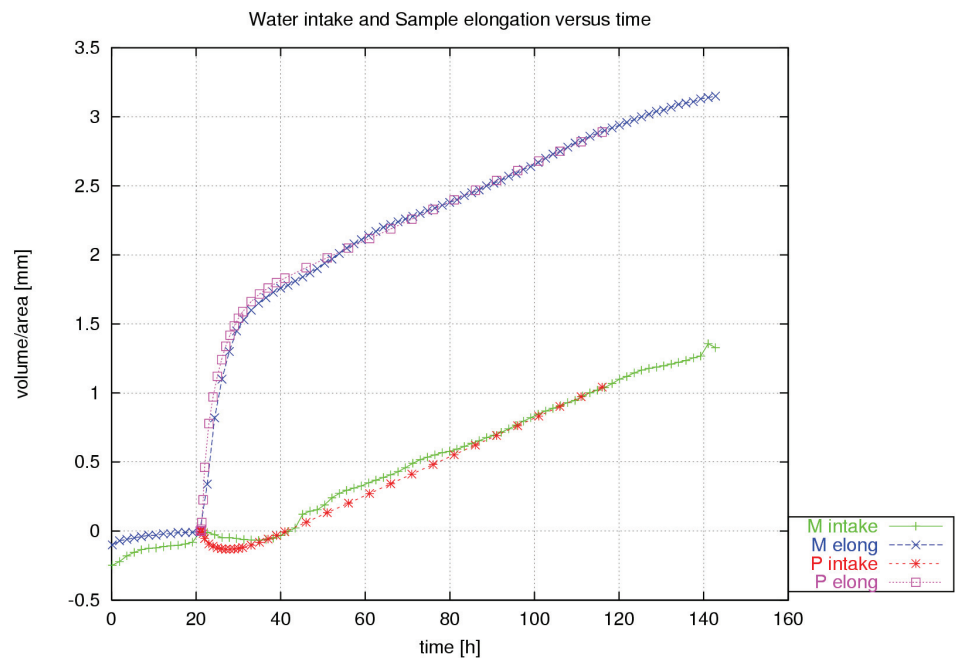
Uit Figuur 34 blijkt dat bij de gewijzigde aanname voor de temperatuur aan de onderkant van de grond weer een goede voorspelling voor de tijdsafhankelijke temperatuursontwikkeling ter plaatse van de opnemers kan worden gedaan. Uit Figuur 35 blijkt dat het uitdrijven van water tijdens bevriezen, het uitzetten en het stationair aanzuigen gedurende vriezen goed kan worden gesimuleerd, zodra een geschikte aanname voor de temperatuursafhankelijke volumeverandering door bevriezen van water wordt gebruikt.



Figuur 33 BK2-4: Voorspelde temperatuursontwikkeling ter plaatse opnemers



Figuur 34 BK2-4: Vergelijking voorspelde en gemeten temperaturen, P = voorspeld, M = gemeten



Figuur 35 BK2-4: Vergelijking voorspelde en gemeten verplaatsing en aanzuiging. M-intake = gemeten inname, M-elong = gemeten verlenging, P-intake = voorspelde inname, P-elong = voorspelde verlenging.

6.5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN MODELLERING

Het bestaande vriesmodel is uitgebreid met rechtstreekse invoer van de *segregation potential* en een experimentele beschrijving van dooi. Verder is de factor $f_{\text{uitzetting}}$ geïntroduceerd, omdat uit de proeven is gebleken dat uitzetting van ijs alleen in zand leidt tot volledige uitdrijving van water, in klei en veen is dat niet het geval.

Op grond van de uitgevoerde ontwikkelingen en simulaties kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De tijdsafhankelijke temperatuursontwikkeling kan goed worden voorspeld, mits voor de temperatuur aan onderzijde van het monster een aanname wordt gedaan die afwijkt van de gemeten waarde aan de onderplaat (15 % hoger).
- De grote thermische isolatie van de perspex wand leidt tot beperkte invloed van thermische verliezen via de wand.
- De uitzetting van water door bevriezen leidt in zand uitsluitend tot wateruitdrijving. Deze wateruitdrijving en volgende aanzuiging door dooi kan goed worden gesimuleerd, wanneer de relatie voor de temperatuursafhankelijke uitzetting van het water/ijs mengsel geschikt wordt gekozen.
- De uitzetting van water door bevriezen leidt in klei vooral tot uitzetting van de klei. Deze uitzetting kan goed worden gesimuleerd, wanneer voor de relatie voor de temperatuursafhankelijke uitzetting van het water/ijs mengsel geschikt wordt gekozen.
- De met aanzuiging gepaard gaande stationaire uitzetting door ijsslensvorming kan met behulp van de Konrad&Morgenstern relatie (SP parameter) eveneens goed worden gesimuleerd.
- De uitgevoerde simulatie van de beschikbare eendimensionale vriesproeven leidt niet tot volledige modelvalidatie. Met name de voorspelling van door vriezen gegenereerde spanningen is daarmee nog niet onderzocht. Als vervolgonderzoek wordt daarom uitvoering en simulatie van tweedimensionale proeven aanbevolen. De resultaten uit deze proeven maken het mogelijk om de invloed van stijfheid, sterkte, (anisotrope) permeabiliteit, kruip en spanningsafhankelijkheid te bestuderen. Alleen op basis van dergelijke proeven kan de voorspellende waarde van het model verder worden gevalideerd en waar nodig verbeterd.
- Nader onderzoek aanbevolen naar de voorspellende waarde van de dooi-beschrijving.
- Tenslotte wordt aanbevolen te onderzoeken bij welke fijnheid van het elementennet in praktijksituaties nog voldoende nauwkeurige resultaten worden verkregen, dit in verband met benodigde rekentijd.

7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

7.1. CONCLUSIES

Het uitgevoerde frostheave onderzoek op 4 Nederlandse grondsoorten heeft geleid tot beter inzicht in de te verwachten effecten van kunstmatige grondbevriezing in de civiele praktijk.

Zoals verwacht gaf het Westerschelde zand geen uitzetting bij bevriezing. Voorwaarde is wel dat de drainage voldoende is; anders zal het opgesloten poriënwater voor ongeveer 4 volumepercent uitzetting zorgen.

De Boomse klei BK2 bleek weinig vorstgevoelig te zijn, in ieder geval minder dan de literatuur suggereerde. De gemeten SP-waarden vallen in de klasse “verwaarloosbaar vorstgevoelig”.

De praktijk bij de Westerscheldetunnel toont echter aan dat er wel degelijk forse vrieseffecten in deze klei kunnen optreden; deze effecten hangen namelijk niet uitsluitend van de SP waarde af. Nader onderzoek is hier geboden.

De vorstgevoeligheid van BK2 bleek goed te voldoen aan de in de literatuur gesuggereerde exponentiële korreldrukafhankelijkheid.

De Zuidpolderklei bleek sterk heterogeen te zijn, hetgeen zich uitte in sterk variabel vriesgedrag. Twee van de zes monsters hadden een relatief hoge SP-waarde en vielen in de categorie “matig vorstgevoelig”, de andere proeven duiden op lage vorstgevoeligheid. De vorstgevoeligheid correleerde niet met de korreldruk of met classificatieparameters, zoals korrelverdeling.

De Hollandveen proefstukken uit Bergambacht bleken eveneens sterk heterogeen te zijn. De vorstgevoeligheid was laag tot verwaarloosbaar. De vorstgevoeligheid correleerde niet met de korreldruk en zwak met classificatieparameters, zoals organisch gehalte of watergehalte.

De uitgevoerde modelvorming met DIANA is op een aantal punten succesvol gebleken:

- De uitzetting van water door bevriezen leidt in zand uitsluitend tot wateruitdrijving. Deze wateruitdrijving en volgende aanzuiging door dooi kan goed worden gesimuleerd, wanneer de relatie voor de temperatuursafhankelijke uitzetting van het water/ijs mengsel geschikt wordt gekozen.
 - De uitzetting van water door bevriezen leidt in klei vooral tot uitzetting van de klei. Deze uitzetting kan goed worden gesimuleerd, wanneer voor de relatie voor de temperatuursafhankelijke uitzetting van het water/ijs mengsel geschikt wordt gekozen.
 - De met aanzuiging gepaard gaande stationaire uitzetting door ijslensvorming kan met behulp van de SP parameter eveneens goed worden gesimuleerd.
-

7.2. AANBEVELINGEN

Het huidige onderzoek heeft alleen het vriesgedrag behandeld bij 1-D vervorming in gedraineerde omstandigheden. Bij civiele vriesprojecten in klei- en veenlagen is het goed denkbaar dat er ongedraineerde condities optreden en dat vervorming evenwijdig aan het vorstfront van invloed is op spanningsopbouw door het vriezen.

In 2000 zijn voor het COB project F100 in situ metingen gedaan aan het vrieslichaam voor de bouw van de dwarsverbindingen van de Westerscheldetunnel. Bij deze metingen is telkens een maximum in de door het vrieslichaam op de onbevroren omringende grond uitgeoefende druk gemeten. Dit maximum was van de orde van 700 kPa en lag hoger dan verwacht. De maximale spanning zal overigens per grondsoort en geometrie anders zijn. De metingen bij de Westerscheldetunnel hebben verder uitgewezen dat de spanningsspreiding over het bevroren lichaam sterk afhankelijk is van de stijfheidmodulus van de bevroren grond en dat ingesloten water hier een grote invloed op heeft.

Aanbevolen wordt om experimenteel vervolgonderzoek en modeluitbreiding vooral te richten op deze effecten, dat wil zeggen op de spanningsopbouw evenwijdig en loodrecht op het vorstfront bij ongedraineerde condities. Daarmee wordt het praktisch belang van het rekenmodel sterk vergroot.

Voor de verdere ontwikkeling en validatie van het numerieke model GeoFreeze is het nodig dat:

- sterkte en stijfheid van bevroren Nederlandse grondsoorten als functie van de temperatuur worden vastgelegd
- het model wordt gevalideerd in 2-D en 3-D vriessituaties, zoals bijvoorbeeld bij de dwarsverbindingen van de Westerscheldetunnel zijn opgetreden.

8. REFERENTIES

- [COB 1999]
M530-01 GRONDBEVRIEZEN CUR/COB *december 1999*
- [COB 2002]
F100-E-02-079 AANLEG DWARSVERBINDINGEN MET GRONDBEVRIEZING BIJ DE WESTERSCHELDETUNNEL (F100) *2002*
- [DIANA 1988a]
DIANA HANDLEIDING POTENTIAL FLOW, RELEASE 7 *1988*
- [DIANA 1988b]
DIANA HANDLEIDING NONLINEAR ANALYSIS, RELEASE 7 *1988*
- [DIANA 1988c]
DIANA HANDLEIDING FLOW STRESS ANALYSIS, RELEASE 7 *1988*
- [ISSMFE 1989]
WORK REPORT 1985-1989 OF THE TECHNICAL COMMITTEE ON FROST,
 TC8, *Frost in engineering* (ed. Rathmeyer, H.) IS VTT94 Espoo Finland, 1, pp.15-70. *1989*
- [Jessberger 1988]
VEREISUNG DER QUERSCHLÄGE (REF.: B82591/SC/JS) *1998*
- [Jessberger 1990]
GRUNDBAU TASCHENBUCH, VIERTE AUFLAGE
 Jessberger, H.J. en Joagow-Klaff R., Frost im Baugrund. *1990*
- [Konrad 1983]
FROST SUSCEPTIBILITY OF SOILS IN TERMS OF THEIR SEGREGATION POTENTIAL
 Konrad, J.M. and Morgenstern, N.R.. Nat.Academy Press. Washington, pp. 652-663. *1983*
- [Konrad 1980]
A MECHANIC THEORY OF ICE LENS FORMATION IN FINE GRAINED SOILS
 Konrad, J.M. and Morgenstern, N.R., Canadian Geotechnical Journal, 17, pp. 473-486 *1980*
- [Konrad 1982]
***EFFECTS OF APPLIED PRESSURE ON FREEZING SOILS**
 Konrad, J.M. and Morgenstern, N.R., , Canadian Geotechnical Journal, 19, pp. 494-505 *1982*
- [Konrad 1993]
***A MODEL FOR WATER TRANSPORT AND ICE LENSING IN FREEZING SOILS, WATER RESOURCES RESEARCH**
 Konrad, J.M., , 29, pp. 223-245 *1993*
- [Konrad 1994]
SIXTEENTH CANADIAN GEOTECHNICAL COLLOQUIUM: FROSTHEAVE IN SOILS: CONCEPT AND ENGINEERING
 Konrad, J.M., Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, No. 2 *1994*

- [Martin 1959]
RHYTHMIC ICE BANDING IN SOIL", SOIL ENGINEERING DIVISION
 Martin, R.T. MIT, Highway Research Board Bulletin 218, pp. 11-23 1959
- [Miller 1972]
FREEZING AND HEAVING OF SATURATED AND UNSATURATED SOILS
 Miller, R.D, Highway Research record 393 1972
- [Ohrai 1991]
DISPLACEMENT AND INCREMENT IN EARTH PRESSURE IN UNFROZEN SOIL BY FROSTHEAVE
 Ohrai, T. Ground Freezing 1991, Yu & Wang, pp 205 – 210 1991
- [Proceedings ITA 2002 Sydney]
IN-SITU FROST HEAVE LOADS IN ARTIFICALLY FROZEN GROUND FOR TUNNELING
 Rijkers R.H.B., Hemmen B.R., Naaktgeboren N.M., Weigl H. 2002
- [Rijkers 2000]
SOIL BEHAVIOUR DURING ARTIFICIAL FREEZING – PART 2: APPLICATION IN BORED TUNNELS
 Rijkers, R, Naaktgeboren, M., Côté, H., Thimus, J.-F., Visschedijk M., In: ISGF2000 – Frost action in soils (ed. J.F. Thimus), Louvain-la-Neuve, pp. 237-242 2000
- [Schepers 2002]
FROSTHEAVE TESTING ON DUTCH SOILS; AFSTUDEERVERSLAG TU DELFT AARDWETENSCHAPPENW & GEODELFT maart 2002
- [Taber 1930]
THE MECHANISM OF FROST HEAVING
 Taber, S. " ", Journal Geology, 38:308 1930
- [TNO 2001]
AANLEG MIDDELS GRONDBEVRIEZING BIJ DE WESTERSCHELDETUNNEL (F100), VOLUME 1:TOELICHTINGBEWERKING EN EVALUATIE VAN MEETDATA TNO-RAPPORT NITG-01-42-B april 2001
- [Weerts 2000]
DE LITHOSTRATIGRAFISCHE INDELING VAN NEDERLAND – FORMATIES UIT HET TERTIAIR EN KWARTAIR
 Weerts. H.J.T., Cleveringa, P., Ebbing, J.H.J., De Lang, F.D. & Westerhoff, W.E. (in Dutch). Netherlands Institute of Applied Geosciences (TNO-NITG) (Utrecht, NL), TNO- Report NITG 00-95-A: 38 pp. 2000
- [Werkplan 2000]
GRONDBEVRIEZING EN CIVIELE WERKEN VERSIE 7.1
 GD/TNO-NITG, Delft Cluster Thema 1, nr. 01.02.02 22 september 2000
- [Williams 1988]
VOLUME CHANGE IN FROZEN SOILS
 Williams, P.J. " ", Norwegian Geotechnical Institute, pp. 187-208 1988

COB — CENTRUM ONDERGRONDS BOUWEN

Het Centrum Ondergronds Bouwen is een Nederlands publiek-privaat samenwerkingsverband. Een toonaangevend kennisnetwerk dat oog en oor wil zijn voor alles wat met ondergronds bouwen te maken heeft. Vanuit de visie dat ondergronds ruimtegebruik een essentiële bijdrage levert aan een mooi, leefbaar en slagvaardig Nederland, stimuleert het COB de dialoog tussen alle mogelijke partijen die een rol spelen bij de verkennende belevenissen en mogelijkheden van het bouwen onder de grond. Naast het (vreed) uitvoeren van onderzoeken, is het COB actief op het gebied van communicatie, kennismanagement en onderwijs, onder meer door de ondersteuning van een leerstoel ondergronds bouwen aan de TU Delft. Meer dan honderd organisaties uit het bedrijfsleven, de overheid alsmede kennisinstellingen bundelen in het COB hun krachten en expertise. Het COB maakt deel uit van het netwerk van het Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (CUR) en steunt zijn activiteiten af met andere deelnemers aan dat netwerk, zoals Habiforum (Expertisecentrum Meerwaardig Ruimtegebruik). Daarnaast heeft het COB een Memorandum Of Understanding (MOU) met de Japanse Tunneling Association (JTA) en stimuleert het internationale uitwisselingen met Japan en andere landen.

De vele vraagstukken omtrent ondergronds bouwen die nog op ontginning wachten, worden benaderd vanuit zes thema's. De benadering staat garant voor een brede en integrale benadering van de kennislacunes op het gebied van ondergronds ruimtegebruik.

RUIJTELIIK ONTWERP
PLANOLOGIE EN BESTUURLIIK INSTRUMENTARIUM
BELEVING EN VEILIGHEID
NATUUR- EN MILIEUASPECTEN
TECHNOLOGIE
ECONOMIE EN PROCESSEN

'GEMEENSCHAPPELIJK PRAKTIJKONDERZOEK BOORTUNNELS GPB'

Na het succesvolle verloop van het praktijkonderzoek bij de Tweede Hoofdwandtunnel en de Botlekspoortunnel bleek het voor vijf nog op handen zijnde Nederlandse boortunnelprojecten efficiënter om het nog benodigde onderzoek te verdelen. Daarom gaasen de opdrachtgevers van vijf Nederlandse boortunnelprojecten en COB half september 2000 door de ondertekening van de Overeenkomst Gemeenschappelijk Praktijkonderzoek Boortunnels (GPB) hun goedkeuring aan een masterplan praktijkonderzoek. Onder de paraplu van het Centrum Ondergronds Bouwen bepaalden zij welk onderzoek waar het beste zou kunnen plaatsvinden.

Binnen het masterplan GPB wordt onderzoek gedefinieerd ter plaatse van Westerschelde-tunnel (F100), Soepkloppoort-tunnel (F200), Tunnel Paandensch Kanaal (F500), Boortunnel Groene Hart (F510) en de Noord-Zuidlijn (F530). Tijdens de uitvoering van deze boortunnels met grote diameter zullen metlagen en experimenten worden uitgevoerd, waarmee de kennis ten aanzien van de geboorte tunnel als bouwmethode wordt vergroot. Hierbij worden ondermeer zaken onderzocht als metlagen aan dwarsverbindingen, mogelijkheden tot hergebruik van vrijkomende grond, optreden van zowel van diepegelegen kleilagen, volgen van het boorproces en gericht evaluatie van meetgegevens. Het betreft dus ook uitvoeringsgerelateerd onderzoek met oog op het verkleinen van risico's en kosten bij toekomstige tunnelprojecten.

De partijen verleggenwoordigd binnen het Plaatsingsverdrag GPB:
Managementgroep Betuweroute van NS Railinfra-beheer,
Projectbureau Noordelijk Holland - Directie HLS-Zuid - Ministerie van Verkeer & Waterstaat,
Projectbureau Noord-Zuidlijn - Dienst Infrastructuur Verkeer en Vervoer van de Gemeente Amsterdam,
Centrum Ondergronds Bouwen (COB),
Bouwdienst Rijkswaterstaat - Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat - Ministerie van Verkeer & Waterstaat
Delft Cluster.

CENTRUM ONDERGRONDS BOUWEN

Wachweg 1
Postbus 428
3800 AK GORUM
T 0182-546640
F 0182-546641
E cob@cur.nl
www.cob.nl