

HET GEBRUIK VAN STEEN IN
WATERBOUWKUNDIGE CONSTRUCTIES

Ing. G.J. Laan
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Inhoud

	Pagina
1. Inleiding	3
2. Eigenschappen van materialen en eisen	3
2.1 Structuur in eisen	3
3. Materialen, eigenschappen en regelgeving	5
3.1 Breuksteen	5
3.1.1 Algemeen	5
3.1.2 Dichtheid en wateropneming	7
3.1.3 Sterkte	8
3.1.3.1 Weerstand tegen breuk	9
3.1.3.2 Bloksterkte	10
3.1.3.3 Weerstand tegen slijtage	12
3.1.4 Weerstand tegen vorst- en dooiwisselingen	12
3.1.5 Weerstand tegen zoutkristallisatie	12
3.1.6 Zonnebrand en andere verweringsverschijnselen	13
3.1.7 Uitloging	13
3.1.8 Kleur	14
3.1.9 Sorteringen	14
3.1.10 Vorm van de steenstukken	17
3.1.10.1 Platte steenstukken	17
3.1.10.2 Rondheid	17
3.1.11 Verontreinigingen	18
3.2 Overige natuurlijke en samengestelde materialen	18
3.2.1 Zetsteen	18
3.2.2 Steenslag	18
3.2.3 Grind	19
3.2.4 Schanskorven	20
3.2.5 Betonelementen	20
3.3 Secundaire materialen	21
3.3.1 Mijnssteen	21
3.3.2 Slakken	22
3.3.2.1 Staalslakken	22
3.3.2.2 Fosforlakken	23
3.3.3 Silex	23
3.3.4 Puingranulaten	24
4. Kwaliteitsborging	24
4.1 De aard van het werk	25
4.2 Intrinsieke eigenschappen	25
4.3 Produktie-bepaalde eigenschappen	26
4.4 Verwerkings-afhankelijke eigenschappen	27

1. Inleiding

In de "Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering" worden in hoofdstuk 3 materialen voor waterbouwkundige constructies behandeld. Nog iets uitgebreider wordt dit in (18) gedaan. In deze cursusbijdrage worden enige belangrijke aspecten van steenmaterialen vanuit specifieke gezichtshoeken behandeld.

Allereerst worden via een zogenaamde "structuur in eisen" materiaaleigenschappen en daarop gerichte eisen in verband gebracht met constructieve doelstellingen. Vervolgens worden steen- en steenachtige materialen behandeld. Hierbij wordt gerefereerd aan regelgeving in Nederland en aan zich ontwikkelende Europese normen. Waar wenselijk worden eisen geïnterpreteerd in de context van "structuur in eisen". Secundaire materialen worden kort behandeld.

Tenslotte wordt ingegaan op kwaliteitsborging in de diverse fasen van productie en verwerking van steenmaterialen.

2. Eigenschappen van materialen en eisen

Eisen gesteld aan eigenschappen van materialen voor waterbouwkundige constructies zijn soms lastig met het werkelijke constructieve gedrag in verband te brengen. Uit een sterkte-eis voor steen bijvoorbeeld kan niet direct afgeleid worden welke verfijningen in bepaalde omstandigheden waarin een constructie moet functioneren zullen optreden. Gewoonlijk hebben dergelijke eisen meer het karakter van een classificatie-eis die ruim voldoende is in de meeste omstandigheden. De vraag of zo'n eis niet veelal veel te zwaar is, is van belang bij toepassen van meer marginale materialen.

In het algemeen is het zo dat er de laatste decennia een sterke vergroting van de nauwkeurigheid van ontwerpmodellen bereikt is. Dit doet ook in toenemende mate de vraag rijzen naar een preciezer definiëren en borgen van relevante materiaaleigenschappen.

Voor de analyse van de samenhang tussen materiaaleigenschappen en constructief gedrag is de methodiek volgens "structuur in eisen" goed bruikbaar. Deze methodiek levert tevens een inzicht op in leemten in kennis en in risico's met betrekking tot "te zwak" of "te sterk" dimensioneren.

Hierna wordt in hoofdlijnen op "structuur in eisen" ingegaan.

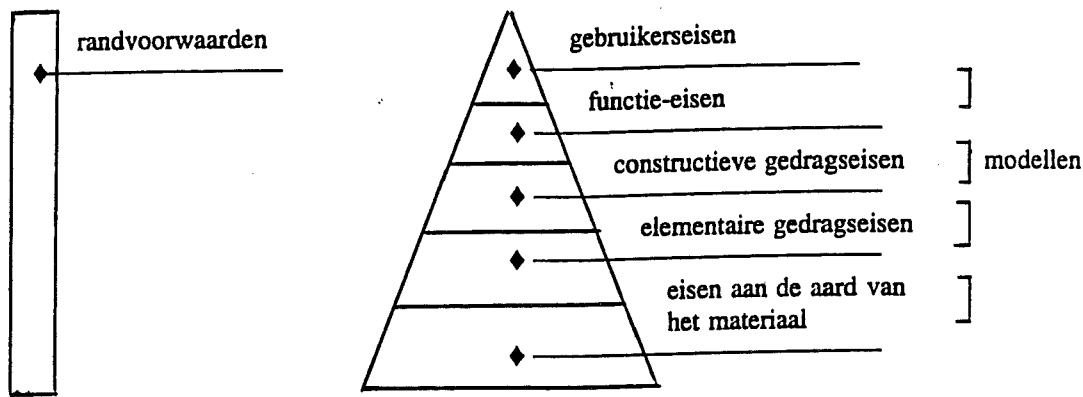
2.1 Structuur in eisen

In "structuur in eisen" komen in hoofdlijnen de volgende elementen voor: hiërarchisch geledede eisen, randvoorwaarden en interacties tussen eigenschappen op de diverse eisenniveaus, uitgedrukt in modellen.

De kern van het kennissysteem "structuur in eisen" bestaat uit een hiërarchische geleding in eisen. De geleding betreft groepsgewijs onderscheid in soorten eisen. Deze soorten staan in hiërarchisch verband tot elkaar, omdat de ene soort eisen afgeleid kan worden danwel volgt uit de andere groep eisen en gestelde randvoorwaarden.

Deze hiërarchische geleding wordt de piramide van eisen genoemd.

Van boven naar beneden treffen we in de piramide de volgende eisen-geledingen aan: gebruikerseisen, functie-eisen, constructieve gedragseisen, elementaire gedragseisen en eisen aan de aard van het materiaal (zie figuur 1).



Figuur 1: Structuur in eisen

Gebruikerseisen zijn eisen die de uiteindelijke gebruiker stelt aan de constructie en hebben in het algemeen een abstract karakter. De gebruikerseisen worden algemeen beleidsmatig verwoord. Gebruikerseisen hebben bijvoorbeeld betrekking op veiligheid en recreatiemogelijkheden.

Functie-eisen zijn op het niveau van functies van een waterbouwkundige constructie of onderdeel daarvan gesteld. Het gaat hier om welke prestaties geleverd moeten worden zonder nog enige constructieve of materiaalkundige invulling te betrekken. Functie-eisen zijn of betreffen bijvoorbeeld waterkeren met een zekere overschrijdingskans of erosie voorkomen.

Constructieve gedragseisen hebben betrekking op het gedrag van de totale constructie of een onderdeel daarvan. Op grond van deze eisen kan een constructief ontwerp inclusief daarbij betrokken materiaalkeuzen getoetst worden. Deze eisen kunnen betrekking hebben op bijvoorbeeld stabiliteit of begaanbaarheid.

Elementaire materiaalgedragseisen hebben betrekking op gedragingen van een representatieve kleine hoeveelheid materiaal. Het woord "elementair" heeft betrekking op de kleinste hoeveelheid materiaal waarop de gedragseigenschap nog betrekking kan hebben. Het kan bijvoorbeeld de bestandheid tegen vorst- en dooiwisselingen betreffen van een representatief aantal steenstukken.

Elementair gedrag kan soms ook in de constructie gemeten worden. Zo kan stijfheid van asfalt aan een element in het laboratorium gemeten worden maar ook met bijvoorbeeld plaatdrukproeven.

Eisen aan de aard van het materiaal hebben betrekking op chemisch/mineralogische, fysische en morfologische aspecten zonder enige gedragsimplicatie.

De volgende aardaspecten worden bijvoorbeeld onderscheiden: massaverdeling, dichtheid en wateropneming van steenstukken.

Randvoorwaarden worden bepaald door de omgeving waarin de waterbouwkundige constructie voorkomt. Deze voorwaarden zijn uitgangspunten voor het constructieve, danwel materiaalkundige ontwerp. Er worden drie soorten randvoorwaarden onderscheiden welke betrekking hebben op omgevingsfactoren, constructiefactoren en beleidsfactoren.

Omgevingsfactoren zijn onder andere:

- zettingsgedrag bodem;
- omgevingsbestemming (waterwin- of natuurgebied etc.);
- weersgesteldheid (bepalend voor bijvoorbeeld de mate van vorstindringing);
- golfregime.

Constructiefactoren betreffen bijvoorbeeld de constructie-opbouw (geldt voor structuur in eisen voor een constructie-onderdeel) of een in de constructie op te nemen bestaande constructie.

Naast voornoemde factoren kunnen algemene beleidsvoorwaarden gelden waaruit bepaalde keuzen reeds min of meer zijn vastgesteld, bijvoorbeeld: importrestricties voor zekere materialen of voorkeursbeleid ten aanzien van bepaalde materialen (stimulering hergebruik of gebruik van secundaire materialen etc.).

Uitgaande van de randvoorwaarden dienen relaties tussen factoren op diverse eiseniveaus in de piramide bekend te zijn om eisen te kunnen bepalen opdat aan functie- en daarmee gebruikerseisen kan worden voldaan. Dergelijke modellen kunnen van diverse aard zijn zoals rekenkundige modellen, beschrijvende of ervaringsmodellen.

Ervaringsmodellen hebben een beperkte waarde omdat zij slechts gehanteerd kunnen worden in situaties waarin niet van deze ervaringen wordt afgeweken. Dergelijke afwijkingen komen vooral tegenwoordig veel voor en betreffen allerhande aspecten, zoals nieuwe materialen en andere of nieuwe randvoorwaarden, bijvoorbeeld ten aanzien van het milieu.

Beschrijvende modellen bieden door de verklarende werking van interacties meer mogelijkheden om in nieuwe situaties voor toetsing van geschiktheid van materialen te kunnen gebruiken.

Kwantitatieve modellen zijn in de waterbouw betrekkelijk ver ontwikkeld voor filtergedrag en stabiliteit. Ten aanzien van duurzaamheid is echter nog weinig voorhanden. Voor nauwkeurige kwantitatieve modellen geldt dat doorgaans een grote verscheidenheid aan randvoorwaarden en materiaalparameters een rol spelen.

Analyse daarvan leidt dan ook enerzijds tot conclusies ten aanzien van de mate van gebrekkigheid van deze modellen, anderzijds worden daardoor leemten in kennis opgespoord, waarop onderzoek gericht kan worden.

De in het kort beschreven "structuur in eisen" biedt een hulpmiddel om eisen af te leiden danwel te evalueren. Een vluchtige beoordeling van deze structuur maakt duidelijk dat eisen een betrekkelijke betekenis hebben. Een beperkte duurzaamheid kan bijvoorbeeld gecompenseerd worden door overdimensionering of onderhoud met een hoger frequentie. Op gebrek aan duurzaamheid in de vorm van geringe bloksterkte kan geanticipeerd worden door vermijden van grote belastingen bij transport, overslag en in de constructie. Dichtheid en sorteringzwaarte kunnen deels onderling compenserend werken.

Deze relativeringen van eisen, vooral van algemeen gestelde standardeisen, zijn van belang wanneer vanwege beschikbaarheid, gelet op transportafstanden, of vanwege grondstoffenbeleid, bijvoorbeeld met betrekking tot secundaire materialen, meer marginale materialen ingezet dienen te worden. Een gedegen analyse volgens "structuur in eisen" is dan wel een noodzaak om risico's voldoende te kunnen bepalen en beperken.

3. Materialen, eigenschappen en regelgeving

3.1 Breuksteen

3.1.1 Algemeen

Breuksteen is gebroken natuursteen die grover is dan een zekere nominale maat. Materiaal dat fijner is dan deze maat wordt steenslag genoemd. Deze nominale maat is niet overal hetzelfde. In de Nederlandse breuksteennorm NEN 5180 wordt 32 mm aangehouden. In de zich ontwikkelende Europese regelgeving is dit 63 mm.

De natuursteen waaruit breuksteen wordt geproduceerd wordt geologisch naar wordingsgeschiedenis in soorten onderverdeeld. De betekenis van het kennen van deze steensoorten is gelegen in de ruwe relaties die er zijn tussen deze soorten en de relevante eigenschappen van breuksteen zoals dichtheid, vorm van de steenstukken en zwaarte van de te produceren sorteringen.

Er worden in hoofdlijn 3 natuursteensoorten onderscheiden: stollingsgesteenten, sedimentgesteenten en omvormings- oftewel metamorfe gesteenten.

Stollingsgesteenten ontstaan door kristallisatie van vloeibare magma. Dit kan gebeuren diep in de aardkorst (dieptegesteente), in het bovenste deel van de aardkorst (ganggesteente) of aan het oppervlak (uitvloeiings- of vulkanisch gesteente).

Sedimentgesteente ontstaat door sedimentatie en vervolgens verstening van het sediment.

Metamorf gesteente ontstaat door uitoefening van hoge druk en temperatuur op stollings- of sedimentgesteente, waardoor nieuwe mineralen en steentexturen gevormd worden.

Voorbeelden van dieptegesteenten zijn graniet, syeniet, dioriet, gabbro en peridotiet. In genoemde volgorde wordt de steenkleur donkerder en neemt de dichtheid toe. Veelal kunnen zware tot zeer zware sorteringen geproduceerd worden en is de steenvorm kubisch.

Ganggesteente is door de snellere afkoeling van een fijnere mineralogische structuur dan dieptegesteente. Porfier is het meest bekend.

De uitvloeiingsgesteenten vertonen door hun snelle afkoeling kleine tot microscopisch kleine kristallen of soms geen kristallen (vulkanisch glas). Basalt is in de Nederlandse waterbouw bekend vanwege de vroeger veel toegepaste zuilenbasalt. Soms is deze zuilvorm minder ontwikkeld. De zuilenstructuur is soms onregelmatig en van grote afmetingen, waardoor zeer zware sorteringen geproduceerd kunnen worden.

Andere voorbeelden van uitvloeiingsgesteente zijn andesiet, doleriet en diabaas (oud uitvloeiingsgesteenten).

Van de sedimentgesteenten zijn de kalksteen en zandsteen de bekendste voorbeelden. Door de gelaagdheid kunnen in deze steensoorten afhankelijk van de laagdikte en de zwaarte van de sortering, plaatvormig materiaal voorkomen. Soms kan zeer massief materiaal in dikke lagen voorkomen waardoor zeer zware sorteringen geproduceerd kunnen worden (zandsteen, petit graniet). Veelal is de gelaagdheid hierbij een bepalende factor. Van de metamorfe gesteenten is marmer, hoewel minder door de waterbouw, wel het bekendste voorbeeld. In de waterbouw is gneis echter wel bekend evenals kwartsiet, amfiboliet en de onlangs in Noorwegen in exploitatie genomen eklogiet, een gesteente met een zeer hoge dichtheid (ca. 3,4 t/m³).

Dunne gelaagdheid en "leisplijting" komen vooral onder de metamorfe steensoorten voor (leisteel, schist, fyllicet). Als gevolg daarvan is de grofheid van te produceren sorteringen beperkt en zijn steenstukken plat.

In elk steenvoorkomen kan de kwaliteit variëren tengevolge van geologische verwerking (zie (7) 3.2.2). Verwerking gaat veelal gepaard met mineralogische omvorming en uitloging. Dit is daarmee zichtbaar door bijvoorbeeld het ontstaan van bruine ijzerverbindingen. Door verwerking neemt de sterkte en weerstand tegen atmosferische invloeden af. Doordat door uitloging de dichtheid is afgenomen, kan veelal de mate van verwerking en daarmee de mate van bruikbaarheid door correlatie met de dichtheid bepaald worden.

In Nederland is natuursteen voor de waterbouw, afgezien van regelmatige steenelementen, synoniem met breuksteen, dat wil zeggen in steengroeven gebroken en gesorteerd steenmateriaal. Dit is niet altijd zo geweest. Zo werd aanvankelijk exclusief gebruik gemaakt van min of meer afgerond steenmateriaal, dat met de ijsstijden in Oost-Nederland is afgezet. Ditzelfde materiaal werd vervolgens ook uit Scandinavië geïmporteerd.

Ook andere natuursteenbronnen komen voor toepassing in aanmerking, zoals steenafzettingen in rivieren en de zee. In Europese normontwikkeling worden alle steenmaterialen, dus ook secundaire, betrokken ("Steen voor waterbouwkundige constructies").

3.1.2 Dichtheid en wateropneming

Dichtheid van steenmateriaal wordt onderscheiden in dichtheid van de vaste stof (ρ_m), dichtheid van het gesteente of een steenstuk (ρ_r) en bulkdichtheid (ρ_b). De dichtheid van de vaste stof en het poriëngehalte van het gesteente bepalen de dichtheid van een steenstuk. De dichtheid van het gesteente en holle ruimte tussen de steenstukken zijn bepalend voor de bulkdichtheid van loskorrelig steenmateriaal.

Dichtheid van het gesteente is een in principe per productieplaats gegeven aard-eigenschap. Wanneer in een groeve meerdere soorten steen voorkomen is selectie op dichtheid wellicht mogelijk. Soms leidt het produktieproces tot een zekere selectie doordat steen met een geringere dichtheid veelal zwakker is en daardoor fijner breekt, waardoor lichtere of fijnere sorteringen een lager dichtheid hebben.

Het primaire belang van dichtheid in waterbouwkundige constructies is de invloed op het elementaire gedrag van een steen in water waar het gaat om weerstand tegen verplaatsing. Deze weerstand is weer de voornaamste factor in de stabiliteit van een loskorrelige oeververdiging tegen waterbeweging. Deze weerstand is evenredig met $\Delta \cdot D_{ni}$, waarin

$$\Delta = \frac{\rho_r - \rho_w}{\rho_w} (\text{relatieve dichtheid});$$

$$D_{ni} = \sqrt[3]{\frac{M_i}{\rho_r}} (\text{nominale diameter})$$

M_i = massa, van het maatgevende steenstuk in het $i\%$ (m/m) punt van een massaverdeling (voor niet te brede sorteringen is gewoonlijk $i = 50\%$ (m/m)).

Uit de evenredigheid met $\Delta \cdot D_{ni}$ blijkt het belang van een hogere dichtheid. In het geval van beperking van de keuzevrijheid tot standaardsorteringen wordt een hogere dichtheid optimaal benut wanneer daarmee de noodzaak van een zwaardere sortering, die tot een veel grotere materiaalbehoefte leidt juist kan worden vermeden. Als voorbeeld geldt dat een sortering 40-200kg met een dichtheid van 2.900 kg/m³ eenzelfde stabiliteit heeft als een sortering 60 - 300 kg met een dichtheid van 2.600 kg/m³. Toepassing van de 40 - 200 kg leidt echter tot een ruim 8% geringere materiaalbehoefte.

De laagdikte bij een sortering op massagrondslag is omgekeerd evenredig met $\rho_r^{1/3}$.

Bij toepassing van een lichtere sortering op grond van de hogere dichtheid is de volumebesparing nog aanzienlijker. Omgekeerd geldt dat het kiezen van een lage dichtheid voor materiaal, dat beneden de toplaag wordt toegepast, tot een rechtevenredig lagere benodigde hoeveelheid steen in tonnen leidt voor een zeker volume.

Het belang van aandacht voor genoemde dichtheidsaspecten is groot gezien de variatie die in de dichtheid van breuksteen voor kan komen: gewoonlijk 2.500 - 3.000 kg/m³, maximaal ongeveer 2.300 - 3.400 kg/m³.

Dichtheid houdt ook verband met duurzaamheidsaspecten van steenmateriaal. Er geldt een ruwe positieve correlatie tussen de dichtheid en de duurzaamheid (sterkte, weerstand tegen vorst/dooi en zout-kristallisatie). Mede om deze reden wordt gewoonlijk een minimum-eis gesteld aan de gemiddelde dichtheid (Nederland 2.500 kg/m³, Duitsland 2.300 kg/m³). Om een grote spreiding in dichtheid te voorkomen kan geëist worden dat 90% (m/m) van het steenmateriaal een dichtheid dient te hebben van ten minste de vereiste gemiddelde dichtheid minus 100 kg/m³ (CEN-norm in voorbereiding). De variatie in dichtheid van natuursteen kan groot zijn wanneer meerdere steensoorten in een groeve voorkomen.

De dichtheid kan bij kwaliteitscontrole vanwege gemakkelijke bepaalbaarheid (NEN 5186, EN 1097-7 in voorbereiding) als indirecte proef dienen voor bepaling van kwaliteitsvariatie met betrekking tot duurzaamheid. De correlatie met de mate van eventuele verwerking in een groeve is zeer goed. Verwerking kan, afhankelijk van de mate daarvan, de duurzaamheid sterk beïnvloeden. Deze mate van verwerking kan veelal visueel beoordeeld worden met de gewoonlijk met verwerking optredende verkleuring van de steen, bijvoorbeeld bruinkleuring door vrijkomend ijzerverbindingen.

Wateropneming W_{ab} vergroot de weerstand tegen verplaatsing.
De stabiliteitsfactor $\Delta \cdot D_n$ wijzigt daardoor in $\Delta' \cdot D_n$, waarin

$$\Delta' = \frac{\rho_x (1 + 0,01 W_{ab}) - \rho_w}{\rho_w}$$

aangesen voor natuursteen
dat een belasting is

Bij het in rekening brengen van de wateropneming geldt dat de relatie tussen de werkelijke wateropneming van een steenstuk en de resultaten van laboratoriumonderzoek naar de wateropneming slechts speculatief zijn. Dit geldt in bijzonder wanneer het steenmateriaal in de constructie zich niet permanent onder water bevindt.

Het vermogen tot wateropneming van steen staat in verband met de bestandheid tegen vorst- en dooiwisselingen (zie 3.1.4) en zoutkristallisatie (zie 3.1.5). Indien de wateropneming bij atmosferische druk (NEN 5187, EN 1097-7 in voorbereiding) beperkt blijft tot maximaal 0,5% (m/m), dan worden deze bestandheden voldoende aanwezig geacht zonder verdere beproeving op deze eigenschappen.

3.1.3 Sterkte

Steen in waterbouwkundige constructies wordt in de fasen van transport, verwerking en constructief functioneren vooral belast door stoot- en schuifkrachten.

Na selectie van sorteringen uit gesprongen gesteente komen, afhankelijk van de omstandigheden tussen winplaats en bouwproject, diverse opslag- en overslaghandelingen voor.

Gewoonlijk wordt breuksteen in (tussen)depots opgeslagen.

Sorteringen met een nominale bovengrens tot circa 50kg worden soms via silo's opgeslagen en verladen. Verlading op rollende en drijvende transportmiddelen gebeurt met wielladers, draad- en hydraulische kranen met een poliepgrijper, kranen met een bak, soms via hijsogen aan steenstukken etc. Dezelfde middelen worden bij het lossen ingezet. Het lossen van auto's en steendumpers door kiepen kan kritische belastingen opleveren.

Voorafgaande aan het in het werk aanbrengen van de steen kan ook sprake zijn van tussenopslag in droge of natte depots.

Tijdens de levensduur in de constructie kunnen steenstukken belast worden door stoot- en schuifkrachten afhankelijk van de mate van stabiliteit van de toplaag. Het rollen van het materiaal in dynamisch stabiele constructies veroorzaakt aanzienlijke schuifbelastingen. Sterke abrasie-effecten die daarbij op kunnen treden kunnen ook veroorzaakt worden door slijtage door in golven en stroming meegevoerd fijn steenmateriaal zoals zand en grind.

Uit de hiervoor summier geduide handelingen met en belastingen van breuksteen volgt dat vooral stoot- en dynamische schuifkrachten van belang zijn voor beschouwing van sterkte van de steen. In het algemeen speelt drukbelasting geen of een ondergeschikte rol. Statische en semi-statische drukbelastingen van enige betekenis komen voor bij berijden van het materiaal met bijvoorbeeld een rupskraan of bulldozer van depots. Dit komt voor bij sorteringen tot nominaal 300 kg. Piekspanningen op steenpunten en -randen kunnen hier vooral tot enige vergruizing leiden.

Sterkte van natuursteen, in de betekenis van weerstand kunnen bieden aan welke krachten dan ook zonder of met een nog acceptabele destructie, kan slechts beperkt uit de aard van het materiaal verklaard worden. Veelal spelen zoveel aardaspecten een rol dat het van daaruit modelleren van sterkte niet haalbaar is, wel zijn zeer globale relaties bekend tussen steensoorten en sterkte-eigenschappen. Per steenvoorkomen dient de sterkte echter altijd bepaald te worden.

De eerder genoemde aardaspecten die van invloed zijn op de sterkte van breuksteen zijn onder andere de aard van de mineralen, de wijze waarop de mineralen ten opzichte van elkaar zijn gepositioneerd, de aard van de cementmatrix tussen de mineralen, vorm en afmetingen van de mineralen, microscheuren aanwezig in het gesteente en geïntroduceerd door het winnings-, productie- en transportproces etc. Op macro-schaal spelen allerhande discontinuïteiten een rol (zie Bloksterkte).

Hierna worden de diverse elementaire sterkte-eigenschappen in relatie tot belastingen en constructief gedrag behandeld.

3.1.3.1 Weerstand tegen breuk

Er bestaan veel proeven voor het meten van de elementaire breuksterkte van steen: statische en dynamische splijtproeven (o.a. rock toughness, fracture toughness, point load, Braziliaanse treksterkte); drukproeven (o.a. druksterkte, verbrijzelingsfactor, 10% fines, aggregate crushing test) en dynamische drukproeven (o.a. aggregate impact value, Los Angeles abrasion, Schlagzertrümmerung).

De hier bedoelde sterkte van breuksteen betreft de weerstand tegen breuk langs nieuwe breukvlakken. Deze weerstand is van belang voor het afbreken en verbrijzelen van hoeken en randen van steenstukken leidend tot afronding en enig massaverlies van steenstukken (type 2 breuk).

Bij de keuze van de optimale proef voor het meten van de breuksterkte gelden de volgende overwegingen:

- Er bestaan in het algemeen goede correlaties tussen de resultaten van statische en dynamische sterkteproeven voorzover dit geen glasachtig materiaal betreft.
- Proeven dit uitgevoerd worden op fijn gebroken materiaal leveren resultaten op die beïnvloed kunnen zijn door de afmetingen van de mineralen in relatie tot de korrelgrootte (vooral een probleem bij grof-minerale gesteenten zoals bij granieten voorkomen) en door microscheuren die ontstaan zijn door de productie van het fijne materiaal. Beide factoren maken dat deze proeven minder geschikt zijn voor breuksteen.

- In het veld uitvoerbare proeven zijn aantrekkelijk voor snelle en direct ter plaatse te verkrijgen informatie.
- Kosten van een proef, mede samenhangend met proefnauwkeurigheid in verband met het aantal te beproeven analysemonsters, zijn mede bepalend voor de keuze van de optimale proef.

Op grond van het hiervoor gestelde en praktische ervaringen met sterkteproeven is voor de CEN-norm (in voorbereiding) voor breuksteen gekozen voor de druksterkte van proefstukken na waterabsorptie (EN 1926 Determination of compressive strength). Deze proef wordt in Duitsland reeds langer voor waterbouwsteen gebruikt. Het ziet ernaar uit dat de eis voor de gemiddelde druksterkte in de CEN-norm voor waterbouwsteen gelijk zal zijn aan de in Duitsland gebruikelijke eis van minimaal 80 MPa. Dit is een milde eis om zwak gesteente uit te sluiten. In Nederland gebruikelijke breuksteensoorten hebben een druksterkte van ongeveer 200 MPa (kalksteen) tot 400 MPa (basalt).

Ten behoeve van een snelle schatting van de druksterkte kan gebruik gemaakt worden van de Point load strength test (International Society of Rock Mechanics, 1985). Tevens zou deze proef in de bedrijfscontrole een rol kunnen spelen.

De relatie tussen de druksterkte (σ_c) en de Point load strenght index ($I_{c(50)}$) is $\sigma_c = 22 I_{c(50)}$, waarbij de druksterkte is bepaald van cylinder met een verhouding tussen lengte en diameter van 2:1.

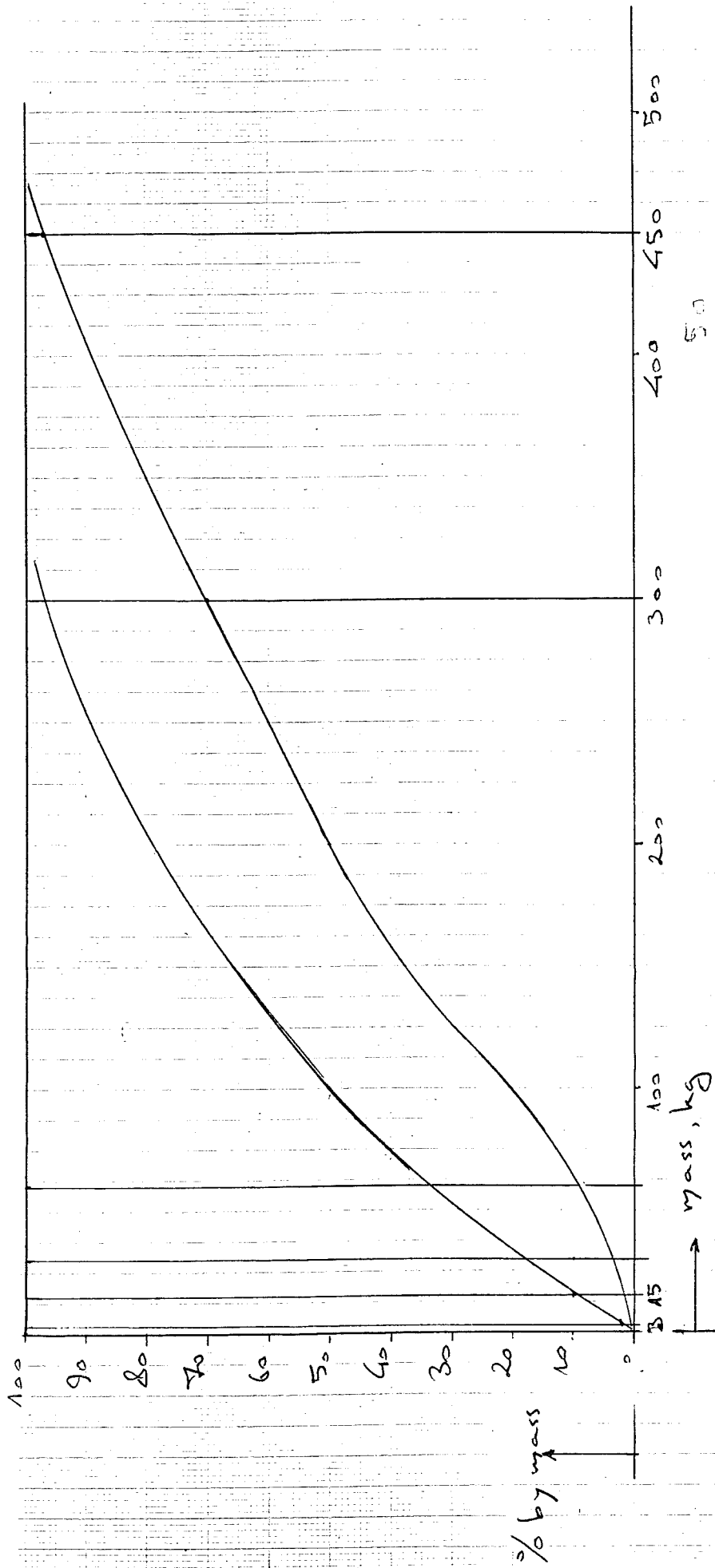
Volgens NEN 5180 geldt een eis voor de dynamische verbrijzelingswaarde (NEN 5185) van ten hoogste 40%. Ook dit is een milde eis, hoewel iets zwaarder dan de minimaal vereiste 80 MPa druksterkte. De dynamische verbrijzelingswaarde betreft het resultaat van een gemodificeerde test ter bepaling van de Aggregate Impact Value (BS 812). De modificatie betreft zeefmaten en afzeven van zeer plat en kubisch materiaal uit het analysemonster teneinde een vormonafhankelijk intrinsieke materiaalparameter te verkrijgen.

De elementaire breuksterkte die met proeven zoals de hiervoor genoemde wordt bepaald geeft slechts een classificatie van het materiaal. Het werkelijke materiaalverlies en de mate van afronding zijn van zoveel onderscheiden belastingen en randvoorwaarden afhankelijk, dat modellering niet mogelijk is en slechts ervaring daarin inzicht kan geven. Praktische ervaring heeft geleerd, dat sterk gesteente met een druksterkte van 200 MPa in ongunstige omstandigheden nog aanzienlijke afronding kan vertonen van fijne en lichte sorteringen.

Voor zware sorteringen is afronding en vooral materiaalverlies in dit verband van veel geringere betekenis.

3.1.3.2 Bloksterkte

Met bloksterkte wordt de weerstand van steenstukken tegen uiteenvallen onder invloed van krachten bedoeld (type 1 breuk). Bedoelde krachten zijn in het begin van dit hoofdstuk 3.1.3 genoemd. Het breken van steenstukken gebeurt vooral langs discontinuïteiten in het steenmateriaal in de vorm van vlakken met weinig sterkte. Dit kan allerlei verschijnselen betreffen zoals scheuren veroorzaakt door het springproces, aderen, gelaagdheid in sediment- en omvormingsgesteente en breuken die gedurende de geologische wordingsgeschiedenis zijn ontstaan en waarin weer min of meer hechting is ontstaan door bijvoorbeeld mineraalvorming. In hoeverre deze discontinuïteiten in steenstukken voorkomen is visueel beoordeelbaar. Vooral inspringende hoeken, waarbij veelal het verdere verloop van een discontinuïteit zichtbaar is, geeft sterke aanwijzingen voor een beperkte bloksterkte.



$$M_{S_0} = 100 - 200 \text{ kg}$$

$$\bar{M} = 46 - 131 \text{ kg}$$

$$M_{\text{req.}} = 45 - 135 \text{ kg}$$

Proposal MS-300 kg

Bij beoordeling van discontinuïteiten in steenmateriaal dient rekening gehouden te worden met het verschijnsel, dat aan de randen van een steenformatie het breukpatroon veelal dichter en anders van configuratie is dan dieper in het steenvoorkomen. Dit beïnvloedt de produceerbaarheid van zware sorteringen, de breukgevoeligheid en de vorm van de steenstukken.

Bloksterkte speelt in het algemeen vooral een rol bij zware sorteringen. Voor lichte en vooral fijne sorteringen geldt immers dat in het breek-zeefproces de discontinuïteiten, vooral de zwakste vlakken, zijn verdwenen door breuk. Het komt echter voor dat ook lichte en soms zelfs fijne sorteringen aanzienlijke verfijning kunnen vertonen door een geringe bloksterkte. Dit is afhankelijk van de dichtheid van het discontinuïteitenpatroon, waarbij bijvoorbeeld een schisteus gesteente in dit opzicht zeer ongunstig kan zijn.

Om de relatie met de in 3.1.3.1 behandelde weerstand tegen breuk aan te geven is het verhelderend dat een geringe weerstand tegen breuk een gunstige invloed op de bloksterkte kan hebben. Door verbrijzeling aan het oppervlak door een geringe breuksterkte treedt energieverlies danwel demping van de stoot op, waardoor spanningen in het blok, eventueel leidend tot breuk, geringer zijn.

De bloksterkte kan gemeten worden door meting van verandering van de massaverdeling bij proefleveringen, door valproeven of door ultrasone metingen.

Er bestaat geen genormaliseerde valproef. In internationaal verband zijn daartoe wel voorstellen gedaan.

Zware steensorteringen kunnen beproefd worden door bijvoorbeeld 50 steenstukken achtereenvolgens te laten vallen over een hoogte van 3m op een vloer van kubische steenstukken met een massa die minimaal gelijk is aan het te beproeven zwaarste steenstuk. Door wegingen worden de gemiddelde massa van de steenstukken voor en na weging bepaald, en het ontstane schervengehalte.

Lichte sorteringen kunnen op dezelfde wijze op een vloer van zware steenstukken beproefd worden. Daarbij kunnen per val meerdere steenstukken tegelijk bijvoorbeeld met een wielladerbak, aan de val onderworpen worden.

Fijne sorteringen kunnen met een valhoogte van 3m op een betonnen vloer beproefd worden. Monsters zoals voor de bepaling van de korrelverdeling vereist zijn kunnen na bepaling van de korrelverdeling in een val per monster op verandering van de korrelverdeling onderzocht worden. De valhoogte van 3m is als standaardhoogte gekozen, omdat daarbij de uitvoerbaarheid nog goed mogelijk is en omdat de destructieve invloed daarbij overeenkomt met wat gemiddeld aan verfijnende invloed bij transport en overslag geacht wordt voor te komen.

Bij een vaste valhoogte zijn meetresultaten onderling vergelijkbaar. De valhoogte kan in specifieke gevallen aangepast worden aan de werkelijk optredende belastingen.

Door een vergelijk van de valenergie in de valproef met de werkelijk optredende belastingen kunnen de resultaten van de valproef schattenderwijs geïnterpreteerd worden naar de werkelijk optredende verfijning. Een exacte modellering is in deze niet voorhanden.

De ultrasone meting berust op het principe, dat de snelheid van voortplanten van een in een steenstuk op een bepaald punt geïntroduceerde trilling, afhankelijk is van de aanwezigheid van discontinuïteiten [LCPC 1989]. In Frankrijk is de proef genormaliseerd.

De relatie tussen de resultaten van deze elementaire gedragsproef en het werkelijke gedrag moet door valproeven of/een vergelijking met werkelijk optredende verfijning vastgesteld worden. In elk geval is de ultrasone proef een goed classificatiemiddel voor de bloksterkte.

3.1.3.3 Weerstand tegen slijtage

Steenmateriaal in de toplaag van een constructie kan, zoals in het begin van dit hoofdstuk 3.1.3 is aangegeven, aan aanzienlijke slijtage door abrasie blootgesteld zijn. Dit geldt ook voor de overslag- en transportfase van fijne en lichte sorteringen. In CEN-verband is voor het meten van het elementaire gedrag in deze gekozen voor de natte micro-Devalproef (NFP 18-577 (1979), EN 1097-1 Determination of the resistance to wear, in voorbereiding). In deze proef wordt fijn gebroken steenmateriaal samen met stalen kogels en water in een cilindervormig vat gedurende een zekere tijd met een bepaalde snelheid rondgedraaid. Vervolgens wordt het verlies aan massa in de vorm van fijn afgesleten materiaal gemeten. In de CEN-norm voor waterbouwsteen zullen op basis van de bepaalde micro-Devalcoëfficiënt diverse sterkteklassen onderscheiden worden. Micro-Devalcoëfficiënten van 5 tot 40 representeren zeer slijtvast tot respectievelijk zeer abrasiegevoelig materiaal.

Voor de relatie tussen het elementaire en het werkelijke (constructieve) gedrag van steenmateriaal, is het werk van J.-P. Latham [Latham J.-P. 1991] van belang. Op grond van een soortgelijke proef als de micro-Deval ontwikkelde hij een degradatiemodel voor steen in waterbouwkundige constructies.

3.1.4 Weerstand tegen vorst- en dooiwisselingen

In gebieden waar vorst- en dooiwisselingen optreden kan steenmateriaal diensgevolge aangetast worden door verlies aan materiaal en breuk. Diep in constructies en onder water waar geen bevriezing optreedt spelen eisen ten aanzien van deze weerstand geen rol. Het destructieve principe bestaat uit volumeverandering van water en aannemen van een vaste vorm bij bevriezing. Bij verhinderde volumevergroting bij bevriezing van water in poriën en (micro)scheuren worden spanningen in het steenmateriaal veroorzaakt, die tot breuk kunnen leiden. Bij een wateropneming bij atmosferische druk tot 0,5% (m/m) wordt dit gevaar niet aanwezig geacht. Blijkt deze opneming meer dan 0,5% (m/m) te zijn dan wordt het materiaal beproefd in een vorst-dooiproef (NEN 5184).

De CEN-proef (EN 1367-1 in voorbereiding) komt in principe overeen met de NEN-beproeving. In de proef worden steenstukken tot 20kg beproefd. Dit wordt gedaan om micro-scheuren en ander discontinuïteiten in steenstukken voorzover die invloed hebben op de vorst-dooigevoelheid zoveel mogelijk in de proef te betrekken. Beproeving van zwaardere steenstukken stuit op uitvoeringstechnische bezwaren.

Naar het zich laat aanzien zullen in de CEN-normen voor waterbouwsteen soortgelijke eisen voor eenzelfde aantal proefstukken gelden als in NEN 5180 (20 steenstukken, maximaal 1 steenstuk met meer dan 0,5% (m/m) materiaalverlies).

Over de relatie tussen de proefresultaten en het werkelijke (constructieve) gedrag is niet veel meer bekend dan algemene beoordelingen zoals "geen ervaren problemen bij voldoen aan de eisen". Dit lijkt ook aannemelijk te zijn indien men de vorst-dooiproef beschouwd als een proefmodel voor de werkelijkheid. Toch worden incidenteel slechte ervaringen genoemd bij voldoen aan degelijk geachte beproevings-eisen.

3.1.5 Weerstand tegen zoutkristallisatie

Soortgelijk als bij bevriezing van water kunnen in steen spanningen ontstaan door kristallisatie van zout in poriën en scheurtjes. Dit gevaar dreigt in warme klimaten en blootstelling aan zout water. Door herhalende absorptie en verdamping nabij de waterlijn kan het destructieve gevolg optreden, dat vooral afronding van blokken tot gevolg heeft.

Als proefmethode komt vooral de magnesium sulfaat soundness test in aanmerking (BS 6349, EN 1367-2 in voorbereiding).

In [CUR/CIRIA 1991] wordt om soortgelijke redenen als voor de vries-dooiproef het beproeven van zo grof mogelijke steenstukken voorgesteld. Met de BS-proef is onderzoek van de fractie 63-125 mm mogelijk. De CEN-proef gaat uit van de fractie 10-14 mm.

De proef is voor bepaalde steensoorten zoals sommige kalksteensoorten, magnesiumbevattende steen en steen bestaande uit cryptokristallijn kwarts niet geschikt.

In de literatuur komen eisen ten aanzien van het maximaal verlies in de proef voor van 12 tot 18%. Ook hier geldt dat geen exacte modellen bestaan voor de relatie tussen proefresultaat en werkelijk gedrag.

3.1.6 Zonnebrand en andere verweringsverschijnselen

Zonnebrand is een verweringsverschijnsel dat in jonge alkaline basaltsoorten wordt waargenomen. Bij vrijkomen van het materiaal uit de rotsformatie onderscheidt basalt met zonnebrand zich niet van "gezond" materiaal. Door inwerking van de atmosferische omstandigheden ontstaan echter lichtgrijze stervormige vlekjes van waaruit zich haarscheuren ontwikkelen. Binnen enkele maanden tot na tientallen jaren leidt dit tot verzwakking en verbrokkeling van het gesteente. Soms openbaart zich het verschijnsel, kort na het vrijkomen van de basalt, in uiteenvallen van steenstukken in enkele brokken.

Het verschijnsel wordt toegeschreven aan mineralogische omzettingen tijdens de wordingsgeschiedenis van het gesteente waardoor inwendige spanningen zijn ontstaan. Ook wordt de aanwezigheid van zwellende klei als oorzaak aangewezen.

Beproeving vindt plaats met een kookproef (NEN 5188, overeenkomend met EN 1367-3 in voorbereiding). Op grond van ervaring wordt er vanuit gegaan, dat de proef een pessimistisch beeld van het werkelijk gedrag geeft, althans wanneer verondersteld wordt dat zonnebrandverschijnselen tot uiteenvallen zal leiden. In werkelijkheid kan het verweringsproces soms traag verlopen en volgens sommigen in uitzonderlijke gevallen zelfs geheel niet tot ontwikkeling komen. Dit laatste wordt, alhoewel niet bewezen, algemeen verondersteld bij toepassing van basalt met zonnebrand onder water.

Behalve vorst- en dooiwisselingen, zoutkristallisatie en zonnebrand kunnen zwellende kleimineralen tot destructie van steen leiden. Het verschijnsel is bekend van mijnsteen maar ook andere vooral schisteuse gesteenten kunnen daardoor een beperkte levensduur hebben bij blootstelling aan atmosferische condities, waarbij wisselend drogen en bevochtigen optreedt.

De methyleenblauwabsorptieproef biedt een mogelijkheid het gehalte aan actieve kleimineralen in het gesteente te bepalen. Er bestaan diverse proeven die gebruikt kunnen worden voor deze vorm van onbestendigheid. Deze proeven zijn gericht op wisselend drogen en bevochtigen of op abrasie bij aanwezigheid van water. Het is bekend dat de natte micro-Devalproef correlatie vertoont met resultaten van de methyleenblauwproef.

Een kookproef zoals die welke gebruikt wordt voor zonnebrandverschijnselen kan goed gebruikt worden om de beperkte duurzaamheid tengevolge van kleimineralen vast te stellen. Door het koken wordt een effectieve bevochtiging bereikt. Tezamen met een snelle droging bij 110°C leidt dit tot een proef waarbij het zwellend vermogen van sommige kleimineralen maximaal wordt aangesproken. Eventueel kan de kookproef worden herhaald.

3.1.7 Uitloging

Natuurlijke gesteenten kunnen bij uitzondering bezwaren oproepen in verband met uitloging van schadelijke stoffen. Dit gevaar is in het algemeen groter bij secundaire materialen. Regelgeving richt zich vooral op uitloging van stoffen en daarnaast op samenstelling. In Nederland is in deze de (verwachte) in werking treding van het Bouwstoffenbesluit van belang. Volgens dit besluit gelden eisen ten aanzien van samenstelling (aardaspecten) en immissie (constructief gedrag). De immissie wordt volgens rekenmodellen bepaald uit resultaten van uitloogproeven (elementaire gedrag) en toepassingsomstandigheden.

Gewoonlijk zal breuksteen in de categorie-1 materiaal van het Bouwstoffenbesluit vallen. Er gelden daarmee geen toepassingsbeperkingen. Wel dient het materiaal volgens dit besluit na functieverlies van de constructie verwijderd te worden.

Hier wordt verder slechts verwezen naar de vele literatuur, voorlichting en cursussen die in verband hiermee gegeven zijn en nog zullen volgen.

Wereldwijd groeit de aandacht voor effecten van bouwen op het milieu. Regelgeving komt nu versneld tot ontwikkeling. In CEN-verband wordt dit op het gebied van bouwmaterialen ook beoordeeld. Het is nu nog niet duidelijk wanneer Europese regelgeving beschikbaar zal zijn en in hoeverre het Bouwstoffenbesluit hierin terug te vinden zal zijn.

3.1.8 Kleur

Soms is de kleur van steen voor waterbouwkundige constructies van belang. Voorbeelden waar dit het geval is zijn cultuurhistorisch van belang zijnde dijken waarbij onderhoud met het vooral qua kleur en vorm oorspronkelijke gesteente dient plaats te vinden, oeverconstructies in stedelijke gebieden en parken en onderhoudswerken waar men geen "lappendekeneffect" door kleurverschillen wil laten ontstaan.

Het meest gericht werken hier eisen volgens welke slechts (een) bepaalde groeve(n) of groevedeel voor levering in aanmerking komt. Eventueel kan ook met representatieve steenmonsters als kleurenstaal gewerkt worden. Er dient rekening gehouden te worden met een natuurlijke kleurvariatie zoals in een groeve voor kan komen en met kleurveranderingen in de constructie. Het laatste betreft eigenlijke kleurverandering van de steen zoals bij (kolen)kalksteen voorkomt en door verandering van kleur door slib en aangroei.

3.1.9 Sorteringen

Steen voor waterbouwkundige constructies wordt gewoonlijk in een op massa of zeefmaten gesorteerde vorm toegepast.

De volgende overwegingen gelden ten aanzien van het meer of minder nauw sorteren van steenmaterialen:

- Een nauwer gesorteerd materiaal vertoont door geringer gevoeligheid voor ontmenging of door toeval minder snel maatgevende relatief fijne of grove (c.q. lichte of zware) plekken in de top of filterlaag. Nauw gesorteerd materiaal, dat dienaangaande aan zekere eisen voldoet, kan met betrekking tot stabiliteit (stroming, golven) ontwerpkundig door één parameter de D_{n50} , gerepresenteerd worden.
- Nauw gesorteerd materiaal heeft een relatief grote waterdoorlatendheid en holle ruimte. Het laatstgenoemde beperkt de benodigde hoeveelheid steen voor een zeker volume.
- Breed gesorteerd of ongesorteerd materiaal kost minder geld door geringer produktiekosten.
- Breed gesorteerd materiaal kan, mits niet ontmengd het aantal benodigde filterlagen beperken.
- Breed gesorteerd materiaal, mits niet ontmengd, kan met betrekking tot stabiliteit door een hogere D_n -waarde dan D_{n50} gerepresenteerd worden, mits de laag voldoende dik is om verlies aan fijn cq. licht materiaal op te kunnen vangen.
- Breed gesorteerd materiaal leidt tot een geringer benodigd volume aan ballastmateriaal ofwel een groter benodigde massa bij toepassing als vulmateriaal.
- Volgens zekere ervaringen en opvattingen zou een relatief brede sortering een relatief gunstige stabiliteit hebben in vergelijking met zeer nauw gesorteerd materiaal. Hierbij zouden inbedding van zwaardere steenstukken door lichtere een rol spelen (interne stabiliteit) en bescherming tegen uitspoelen van lichtere steenstukken door de zwaardere.

Standaard steensorteringen zijn gegeven voor natuursteen (NEN 5180). De in NEN 5180 genoemde lichte en zware sorteringen worden opgenomen in de Euronorm voor waterbouwsteen. De eisen aan deze sorteringen volgens de Euronorm zullen slechts weinig afwijken van die volgens NEN 5180.

Ook de 3 grofste fijne sorteringen zullen, zij het met nauwere eisen voor de korrelverdeling en onder een andere aanduiding, in de Euronorm opgenomen worden. Deze norm zal bovendien enkele brede fijne en lichte sorteringen als standaardsorteringen geven.

Ontwerpkundig worden diverse parameters afgeleid uit de korrel- en massaverdeling van gedefinieerde sorteringen. Hierbij is veelal conversie vereist van massa (M) naar zeefmaat (D) en vice versa. Als relatie tussen beide grootheden geldt $M = 0,6 \cdot \rho_r \cdot D^3$, waarin ρ_r = dichtheid van het steenmateriaal. De in stabiliteitsformules gehanteerde nominale steendiameter D_n is gedefinieerd als $D_n = (M/\rho_r)^{1/3}$.

Uit een en ander volgt $D_n/D = 0,84$.

Toevoeging van een getalwaarde tot 100 aan de grootheden M, D_n en D, leidend tot bijvoorbeeld de symbolen M_{60} , D_{n60} en D_{60} maakt duidelijk dat een en ander betrekking heeft op de massa van een zodanig steenstuk dat 50% van de totale massa bestaat uit steenstukken met een geringere massa dan M_{60} .

Rekening houdend met de gegeven conversie tussen massa en dichtheid en gegeven de standaardsorteringen volgens NEN 5180 kunnen de ontwerpkundig relevante kengetallen volgens tabel 1 gegeven worden.

Hierbij zijn de M_{60} -waarden per standaardsortering berekend uit de massaverdelingen die op grond van gestelde eisen en praktische ervaring als lichtste en zwaarste sortering gelden. De verhouding tussen M_{60} en de gemiddelde massa van de steenstukken exclusief scherven M varieert tussen 1,3 voor de lichtste lichte sorteringen tot 1,05 voor 1.000-3.000kg. Van zwaardere sorteringen zijn beide waarden ongeveer gelijk.

De sorteringseisen van massaverdelingen omvatten een eis voor de gemiddelde massa M en niet voor M_{60} . Dit is gedaan om een gemakkelijker controle mogelijk te maken. Vooral door weging in bulk en tellen van steenstukken is een eenvoudige controle op M mogelijk.

De dikte d en massa m van de laag zijn berekend op grond van een dichtheid van het steenmateriaal van 2.700kg/m^3 , een laagdikte van $1,5 D_{60}$ en een holle ruimte $n = 38\%$.

De massa m volgt uit:

7
of M
niet schel 1

$$m = 1,5 \cdot D_{60} (1-n) \rho_r = 1,5 \sqrt[3]{\frac{M_{50}}{0,6 \cdot \rho_r}} (1-n) \rho_r = 1,78 (1-n) \sqrt[3]{M_{50} \cdot \rho_r^2}$$

Bij de resultaten van tabel 1 gelden de hierna volgende opmerkingen. Er is voor alle sorteringen uitgegaan van het voldoen aan de eisen op het moment van aanvoer. Voor verfijning door overslag, opslag en verwerking na dit moment dienen eventueel correcties toegepast te worden. Een laagdikte van $1,5 D_{60}$ is in de praktijk gebleken een goede maat te zijn om een samenhangende laag te verkrijgen met een relatief breed gesorteerde 10-60kg. In principe is voor een bredere sortering een grotere laagdikte vereist om overal genoemde samenhang te kunnen verkrijgen.

Om praktische redenen die vooral met de wijze van aanbrengen en dientengevolge homogeniteit van de laagdikte samenhangen kan een minimale ontwerp-laagdikte vereist zijn die groter is dan de kleinste in de tabel genoemde waarden. Ook het gevaar van verstoring van de laag door betreding speelt een rol. Er wordt wel een minimale laagdikte van ongeveer 0,25 m aangehouden.

De laagdikte is in het algemeen behalve van de nauwkeurigheid van aanbrengen ook afhankelijk van de mate waarin controle op de laagdikte en correctie daarvan mogelijk is.

sortering	D ₅₀ [m]	M ₅₀ [kg]	D _{n50} [m]	laag		D ₈₅ [m]	D ₁₅ [m]	D ₈₅ /D ₁₅ gem.
				dikte d [m]	massa m [kg/m ²]			
30/60 mm	0,040-0,050	0,10- 0,20	0,034-0,042	0,07	120	0,061-0,048	0,039-0,028	1,64
40/100 mm	0,063-0,090	0,4 - 1,2	0,053-0,075	0,12	200	0,118-0,086	0,067-0,038	2,01
50/150 mm	0,090-0,125	1,2 - 3,1	0,075-0,110	0,17	300	0,173-0,125	0,096-0,054	2,06
80/200 mm	0,125-0,180	3,1 - 9,3	0,11 -0,15	0,24	400	0,226-0,169	0,136-0,075	1,96
5- 40 kg	0,20 -0,25	13 - 26	0,17 -0,21	0,35	600	0,33 -0,28	0,20 -0,16	1,70
10- 60 kg	0,25 -0,31	26 - 46	0,21 -0,26	0,42	700	0,36 -0,32	0,25 -0,20	1,52
40- 200 kg	0,38 -0,44	90 - 140	0,32 -0,37	0,60	1000	0,54 -0,48	0,37 -0,31	1,50
60- 300 kg	0,45 -0,52	150 - 220	0,38 -0,43	0,72	1200	0,61 -0,55	0,43 -0,36	1,47
300- 1000 kg	0,72 -0,78	595 - 760	0,60 -0,66	1,12	1875	0,92 -0,83	0,66 -0,60	1,39
1000- 3000 kg	1,04 -1,11	1800 -2200	0,87 -0,93	1,61	2700	1,31 -1,20	0,97 -0,88	1,36
3000- 6000 kg	1,37 -1,43	4200 -4800	1,15 -1,20	2,10	3500	1,64 -1,51	1,32 -1,26	1,22
6000-10000 kg	1,66 -1,73	7500 -8500	1,39 -1,45	2,54	4250	1,95 -1,80	1,63 -1,57	1,17

Kengetallen van standaard breuksteensorteringen.

Tabel 1

3.1.10 Vorm van de steenstukken

Aan de vorm van steenstukken kunnen 3 aspecten onderscheiden worden: de mate van platheid (a), de afgerondheid (b) en de oppervlakteruwheid (c). Deze aspecten hebben betekenis voor de volgende elementaire gedrags- en constructie-eigenschappen:

- overslag en plaatsen (a); platte steenstukken geven meer problemen;
- bloksterkte (a); platte stukken breken gemakkelijker;
- laagdikte en stabiliteit, afhankelijk van de plaatsingsmethode (a,b);
- holle ruimte n (b); rondere steenstukken leiden tot een groter n;
- hoek van inwendige wrijving (φ) (a,b,c); ruwer en hoekiger steen leidt tot een grote φ -waarde en de invloed van platheid is afhankelijk van de plaatsingswijze (zie [7] 5.5.3.4).

3.1.10.1 Platte steenstukken

De geometrie van steenstukken kan in lengte, dikte en breedte onderscheiden worden. Praktische meetmethoden en eisen gericht op de resultaten daarvan zijn slechts mogelijk ten aanzien van lengte en dikte. Het onderscheidend criterium voor platte steenstukken is een grotere lengte-dikte verhouding dan 3. Ditzelfde criterium wordt gebruikt voor steenslag in Europese regelgeving. Het gehalte platte stukken berekend op de totale onderzochte massa wordt daarin de shape-index genoemd. Voor steenslag bestaat nog een tweede mogelijkheid om de vorm van steenstukken te karakteriseren. Deze bestaat uit de relatie tussen het gehalte dat een spijlenzeef passeert van fracties die op een ongeveer 1,6 maal grotere vierkante zeefopening blijft liggen (flakiness index).

Platte stukken breuksteen volgens genoemd criterium kunnen zowel steenstukken met een grote breedte (platen door schistositeit of gelaagdheid) als langwerpige steenstukken betreffen (bijvoorbeeld lange basaltzuilen).

NEN 5180 geeft een eis van maximaal 20% (m/m) platte steenstukken. De Europese norm voor waterbouwsteen zal naar verwachting een meer gedifferentieerde eisenstelling laten zien. Dit hangt samen met grotere beïnvloedbaarheid van de vorm van visueel geselecteerde sorteringen en het in het algemeen zeer kubisch zijn van grover c.q. zwaardere sorteringen.

Van zware sorteringen is de gemiddelde waarde van lengte:dikte ongeveer 2. Van fijne sorteringen mijnsteen en sommige andere natuursteensoorten die in dunnere gelaagdheid voorkomen is de gemiddelde lengte:dikteverhouding ongeveer 3. Voor fijne sorteringen overeenkomstig NEN 2580 is een gemiddelde dikte:zeefmaatverhouding vastgesteld van ongeveer 0,75 bij een gemiddelde lengte:dikteverhouding van 2,2.

Op grond van genoemde relaties en de in 3.1.9 gegeven relatie tussen zeefmaat en massa zouden relaties tussen dikte en massa en lengte en massa afgeleid kunnen worden. Dergelijke relaties hebben een gebrekkige bruikbaarheid, omdat de betrouwbaarheid beperkt is door grote variatiecoëfficiënten van de dikte (10 tot 20%) en de lengte (8 tot 13%) geldend voor steenstukken met eenzelfde massa.

3.1.10.2 Rondheid

In de Europese norm voor breuksteen zal een eis opgenomen zijn voor eventuele beperking van het gehalte ronde steenstukken. Het onderscheidend criterium betreft een visueel beoordeeld voorkomen per steenstuk van minder dan 50% gebroken oppervlakte ("ongebroken steenstuk"). Dit criterium wordt ook gehanteerd in de Euronorm in voorbereiding voor steenslag (EN 933-8). Voor waterbouwsteen zal naar verwachting voor hoekig materiaal een eis gelden van maximaal 5% (aantal) ongebroken steenstukken.

3.1.11 Verontreinigingen

Breuksteen kan verontreinigd zijn met van buiten komende stoffen die onwenselijk zijn in verband met de constructieve toepassing of om milieutechnische redenen. Voorbeelden van verontreinigingen zijn hout en metaaldelen, ongeschikt materiaal uit de deklaag van de steenformatie, schadelijke stoffen door dumping van afval op de steenformatie.

Gewoonlijk roepen verontreinigingen in voornoemde betekenis zelden problemen op. Wel is bekend dat soms instabiel materiaal van de deklaag in de breuksteen terecht komt wanneer dit materiaal slechts door springen verwijderd kan worden. Als voorbeeld geldt een "gidslaag" op kalksteen bestaande uit steenmateriaal, dat niet bestand is tegen vocht.

Steenstukken van sorteringen, die gebruikt worden voor penetratie met een cement - of bitumineuze mortel, mogen niet met klei of leem bedekt zijn omdat dit de gewenste hechting met de mortel bedreigt. Deze verontreiniging kan vooral in een nat jaargetijde gemakkelijk optreden.

In de NEN-norm voor breuksteen zijn voor beide vormen van verontreiniging min of meer subjectieve bepalingen opgenomen. Dit zal ook in de CEN-norm voor waterbouwsteen het geval zijn.

De milieutechnische eisen worden door het Bouwstoffenbesluit exact gepreciseerd. Ook in CEN-verband wordt aan dergelijke regelgeving gewerkt.

3.2 Overige natuurlijke en samengestelde materialen

In dit hoofdstukje wordt kort enige aandacht besteed aan de primaire materialen natuursteenblokken en -zuilen, steenslag en grind, en de samengestelde bouwelementen betonblokken en schanskorven.

3.2.1 Zetsteen

In het verleden zijn grote hoeveelheden natuursteenelementen in toplagen van oever- en kustbeschermingsconstructies toegepast. Het ging hierbij om behakte blokken en basaltzuilen. De blokken betroffen vooral kalksteen uit België en in veel mindere mate graniet.

Ingevolge van de arbeidsintensiviteit van de produktie en de sterke loonstijgingen in West-Europa worden deze tegenwoordig dure bouwelementen nog slechts beperkt toegepast. Bovendien zijn nog beschikbare voorraden regelmatig gevormde basaltzuilen in steengroeven (Westerwald) gering. Argumenten voor het toepassen, afgezien van hergebruik, van natuursteenelementen zijn esthetica en reparatie. Bij reconstructie vrijkomende natuursteenelementen worden als zodanig weer hergebruikt of bij kwaliteitsverlies als breuksteen toegepast. Enkele, deels verouderde normen [1,2] kunnen benut worden bij het formuleren van kwaliteitsbepalingen.

3.2.2 Steenslag

Steenslag is fijn gebroken natuursteen uit steengroeven of grind (kiezelslag) met nominale maten tot ongeveer 63 mm. Door een terughoudend beleid in Nederland en de ons omringende landen ten aanzien van de exploitatie van grindvoorkomens in de (land)bodem neemt het gebruik van steenslag uit steengroeven toe.

Steenslag wordt in waterbouwkundige constructies loskorrelig vooral toegepast als filter- en basislaag en als inwasmateriaal voor steenzettingen. Voor het afleiden van eisen die voor zekere toepassingen aan het materiaal gesteld moeten worden dient in principe een functie-analyse gemaakt te worden en dienen de vereiste materiaaleigenschappen uit diensgevolge vereiste constructief gedrag afgeleid te worden. Hierbij kan ten dele gebruik gemaakt worden van hetgeen voor breuksteen is gezegd (3.1). Gezien de voornaamste loskorrelige toepassingen van steenslag is een kritische afleiding van de korrelverdelingseisen vooral van belang.

Wat sterkte betreft is het voordeel van steenslag dat relevante discontinuïteiten in het steenmateriaal zijn weggebroken.

Vanwege de voornaamste belastingen op steenslag en de nadeligheid van het genereren van fijn materiaal door abrasie is aandacht voor de micro-Devalwaarde vooral van belang.

Voor steenslag voor waterbouwkundige toepassingen bestaan geen afzonderlijke normen. In Nederland bestaat ook geen NEN-norm voor steenslag. In CEN-verband wordt een norm voor steenslag (inclusief secundaire materialen) voor ongebonden toepassingen voorbereid. De volgende informatiebronnen bestaan voor steenslag:

- Duitse steenslagnorm [3].
In deze norm worden "Splitt" (0/5 mm, 5/11 mm, 11/22 mm en 22/32 mm), "Edelsplitt" (2/5 mm, 5/8 mm, 8/11 mm, 11/16 mm en 16/22 mm) en "Schotter" (32/45 mm en 45/56 mm) onderscheiden. Aan "Edelsplitt" worden strengere eisen gesteld ten aanzien van korrelverdeling en duurzaamheid.
- Belgische steenslagnorm [4].
Deze norm geeft de volgende nominale sorteringen: 2/4 mm, 2/7 mm, 4/7 mm, 7/10 mm, 7/14 mm, 7/20 mm, 10/14 mm, 14/20 mm, 20/32 mm, 20/40 mm, 32/40 mm en 40/56 mm.
- CUR-aanbevelingen [5].
Deze aanbevelingen geven eisen voor steenslag als toeslagmateriaal voor beton.
- Standaard RAW bepalingen [6], steenslag (kiezelslag) voor bitumineuze mengsels (31.26.01).

Hierbij zij opgemerkt dat diverse eisen in deze voorschriften niet relevant zijn voor loskorrelige waterbouwkundige toepassingen.

De gegeven sorteringen betreffen smalle produktiematen. Bredere sorteringen kunnen door samenstelling verkregen en als zodanig gedefinieerd worden.

3.2.3 Grind

Grind dat in Nederland wordt toegepast is vooral afkomstig uit de stroomgebieden van de Maas (Limburg, België) en de Rijn in Duitsland. Restricties ten aanzien van winning uit genoemde gebieden hebben de belangstelling voor grind van de Noordzee door groeien (aanlanding in Vlissingen).

Grind is een afbraakprodukt van steenformaties, hetgeen verklaarbaar maakt dat grind een sterk en duurzaam materiaal is.

Omdat grind voornamelijk uit afgeronde korrels bestaat is de stabiliteit (evenwichtsdraagvermogen in afhankelijkheid van de hoek van inwendige wrijving) vooral van smal gesorteerd materiaal nogal beperkt. Dit kan vooral op steilere taluds bezwaren oproepen bij toepassing onder een gezette glooiing in verband met slechte begaanbaarheid zonder materiaalverplaatsing bij het aanbrengen van de glooiing en mogelijk kanteling van de zetsteen na het plaatsen.

Grind is in Nederland in vele sorteringen verkrijgbaar tot grof materiaal met maten tot ongeveer 200 mm. Hierbij zij opgemerkt dat de verkrijgbaarheid van zeer grof grind door winningsbeperkingen onder druk is komen te staan.

Als informatiebronnen voor grindkwaliteiten en verkrijgbare sorteringen gelden buitenlandse normen ([3] en [4]), NEN 5905 [10] en verkooporganisaties voor grind. Afwijkende sorteringen zijn veelal mogelijk maar vragen extra kwalitatieve aandacht.

3.2.4 Schanskorven

Schanskorven of gabions zijn doos- of matvormige verstevigde gaasconstructies, gevuld met steenmateriaal [7], hoofdstuk 3.6.10.1. Als producent van de gaaselementen geldt momenteel nog slechts één producent (Maccaferri). Hier wordt slechts gewezen op enkele bijzondere aandachtspunten voor de toepassing van schanskorven.

Allereerst betreft dit het vulmateriaal van de schanskorven voorzover het de sortering betreft. Enerzijds geldt de grootte van de gaasmaat een begrenzing voor de fijne kant van de sortering omdat anders ontoelaatbaar materiaalverlies optreedt. Aan de grove zijde worden beperkingen opgelegd door de afmetingen van de gaasconstructie die de grofste korrelmaat begrenst. Dit leidt vooral voor de dunne matconstructies tot de behoefte aan smalle sorteringen met een geringe fractie fijn materiaal. Belangen van de producent van de schanskorven (weinig massa per korf dus geen kleine maasopeningen) en de steenproducent (geen zodanig smalle sorteringen dat de productiecapaciteit zeer gering wordt) zijn hier strijdig met elkaar, met eventueel nadelige gevolgen voor de gebruiker.

Mede om voornoemde redenen bestaan er op een uitzondering na geen genormaliseerde sorteringen voor schanskorven en worden deze in CEN-verband nu ook niet ontwikkeld. In België bestaat slechts een sortering 2/10 kg die voor schanskorven maar niet voor de matten toepasbaar is.

Een tweede aandachtspunt voor in bijzonder de matconstructies betreft de wijze van vullen.

De schanskorven dienen met een dichte pakking goed gevuld te zijn zodat de steen goed opgesloten is na het bevestigen van de bovenzijde van de korf. In bijzonder bij matconstructies levert dit een probleem op vanwege de gemechaniseerde werkwijze waardoor niet goed aan genoemde voorwaarden voldaan kan worden. Als gevolg daarvan kan steen in matconstructies los komen te liggen en kan materiaal uitzakken waardoor aan de bovenzijde de steenvulling kan verdwijnen. Dit gevaar treedt eerder op bij rond en plat materiaal vanwege een geringe samenhang of hoek van inwendige wrijving in het materiaal.

3.2.5 Betonelementen

Cementbeton wordt in waterbouwkundige constructies in allerlei afmetingen en vormen; als losse elementen ([7] 3.6.8) of in matconstructies ([7] 3.6.10.3) toegepast. Basaltzuilen zijn daarbij door betonzuilen verdrongen.

Voor kwaliteitseisen en kwaliteitscontrole is regelgeving van belang. In Nederland is de volgende informatie van belang:

- Voor met KOMO-certificaat te leveren betonelementen NEN 7024 [8].
- Standaardbesteksbepalingen voor betonblokkenmatten en kunststoffilterdoek, en voor betonelementen [11].

Bijzondere aandacht vraagt bij betonelementen het aspect van bijzondere toeslagmaterialen. Deze materialen worden gebruikt om bijvoorbeeld een duurzaam of stroef oppervlak te verkrijgen, of om een hogere dichtheid te bewerkstelligen. Voor het laatste zijn allerlei materialen gebruikt zoals basalt, koperslakken en staalslakken.

Grove toeslagmaterialen met een hoge dichtheid vereisen een optimaal mengselontwerp om segregatie in de beton te voorkomen en aandacht voor andere specifieke hoedanigheden zoals de mate van bestendigheid van staalslakken, waarvan de mate van beperking van de duurzaamheid van de betonelementen afhankelijk is (zie ook "Staalslakken" 3.3.2.1).

Ook milieutechnische aspecten kunnen, gelet op het Bouwstoffenbesluit, beperkingen in de bruikbaarheid van toeslagmaterialen in beton veroorzaken. Dit geldt met name voor koperslakken.

3.3 Secundaire materialen

Het Nederlandse overheidsbeleid ten aanzien van secundaire bouwstoffen kent diverse doelen waarvan de voornaamste hierna genoemd worden.

Allereerst wordt preventie van afval nagestreefd. Bij het ontwerpen van waterbouwkundige constructies dient dan ook rekening gehouden te worden met de hergebruiksfase. Dit betreft aspecten zoals selectief slopen en herbruikbaarheid van de vrijkomende materialen.

Het toepassen van secundaire grondstoffen, mits milieutechnisch verantwoord. Dit laatste is geregeld in het Bouwstoffenbesluit dat gericht is op milieuhygiënische randvoorwaarden voor de toepassing van bouwstoffen op de bodem en in water.

Verder geeft het beleid aan dat bouwstoffen zo hoogwaardig mogelijk hergebruikt dienen te worden. Dit houdt bijvoorbeeld in dat fosforslakken niet als vul- of ophoogmateriaal gebruikt wordt maar als toeslagmateriaal in beton of als materiaal in een filterlaag of top laag.

Bij dit beleid staat het zuinig zijn met oppervlaktedelfstoffen en het zeker stellen van de bouwstoffenvoorziening voorop. Hierbij werkt ook het Bouwstoffenbesluit stimulerend, waarin verwijdering van bouwstoffen verplicht gesteld wordt nadat een constructie(onderdeel) zijn functie verloren heeft.

Hierna wordt beknopt aandacht besteed aan kwaliteitsaspecten en toepassingsmogelijkheden van enkele steenachtige secundaire materialen.

3.3.1 Mijnssteen

Mijnssteen komt vrij bij de winning van steenkool. In Nederland toegepaste mijnssteen is afkomstig uit lopende produkties in Duitsland en van oude steenbergten waarin de mijnssteen is opgeslagen. Soms wordt uit oude mijnssteenbergen kool gewonnen. Daarbij vrijkomende mijnssteen die gewassen en goed gesorteerd is wordt als bouwstof voor onder andere de waterbouw aangeboden. Dit laatste geldt voor nog grote hoeveelheden mijnssteen in Zuid-Limburg (30 miljoen ton). Deze mijnssteen was aanleiding om tot certificering van mijnssteen over te gaan [12], hetgeen binnenkort voor de Limburgse mijnssteen naar verwachting geëffectueerd zal zijn.

Mijnssteen is, wat verdere regelgeving betreft, nu ook opgenomen in de standaard RAW-Besteksbepalingen (1995 Kust- en Oeverwerken, hoofdstuk 52).

Wat technische eigenschappen betreft ligt vergelijking met breuksteen voor de hand ook al is het materiaal in velerlei opzicht niet zo hoogwaardig bruikbaar. Achtereenvolgens worden de eigenschappen belicht zoals in hoofdstuk 3.1 voor breuksteen is gedaan.

De dichtheid van mijnssteen varieert tussen 2.400 en 2.600 kg/m³ en de wateropneming bij atmosferische druk tussen 1 en 4%.

De elementaire sterkte van onverweerde mijnssteen is betrekkelijk goed. Echter door verweringsgevoeligheid en gelaagdheid treedt gemakkelijk verfijning op. Tussen produktieplaats en aanvoer op een werk kunnen korrelverdelingen diensengevolge grote verschillen vertonen.

Zwarte (ongebrande) mijnssteen is niet bestand tegen vorst- en dooiwisselingen.

Mijnssteen verweert bij blootstelling aan weer en wind, tengevolge van wisselend drogen en bevochtigen, tot plaatvormige delen waarvan de zeefmaat overwegend groter is dan 2 mm. Onder water of diep in een droog depot treedt geen uiteenvallen op.

Milieutechnisch kan mijnssteen in categorie 1 van het Bouwstoffenbesluit vallen. Laagdikte en herkomst zijn hierin bepalend. Mijnssteen in bestaande bergen heeft een hoger sulfaatgehalte dan mijnssteen uit lopende produkties. Omdat in de IPO-interimregeling de eis ten aanzien van dit gehalte strenger is dan volgens het Bouwstoffenbesluit, kan dit tijdelijk belemmerend voor toepassing zijn.

Mijnsteen wordt soms in diverse sorteringen geproduceerd. Dit wordt deels weer teniet gedaan door verfijning. Als te leveren sorteringen zijn 2 standaardsorteringen gedefinieerd: 0/70 mm en 10/125 mm. De D_{85} -, D_{60} - en D_{15} -waarden van deze sorteringen zijn respectievelijk ruwweg 60, 16, 3 mm en 100, 60, 10 mm.

De vorm van de steenstukken is plat (lengte/dikteverhouding gemiddeld ca. 3) en enigszins afgerond.

Mijnsteen is toepasbaar in perskaden, dammen en drempels en als aanvulmateriaal. Het is veel toegepast als een tussenlaag op zand in gloopingsconstructies. Mijnsteen is onder water toepasbaar in een laag ter bestrijding van zanderosie en als filterlaag in een bodemverdediging.

3.3.2 Slakken

In het verleden zijn allerhande slakkensoorten als bijprodukten van metallurgische processen in de waterbouw toegepast. De veelal hoge dichtheid van het materiaal en goede wrijvingseigenschappen door hoekigheid waren daarbij in bijzonder aantrekkelijk. Door wegvallen van produkties (molybdeen- en silicomangaanslakken) of om milieutechnische redenen (loodslakken, koperslakken, staalslakken van edelstaalbereiding) worden diverse soorten slakken niet meer toegepast. Ook de uit koperslak bereiden koperslakblokken worden niet meer vervaardigd. Hergebruik van deze zeer duurzame blokken komt wel voor.

Voor toepassing in de waterbouw komen tegenwoordig nog staalslakken (LD-slakken en electroovenslakken uit de bereiding van ongelegeerd koolstofstaal) en fosforslakken nog in aanmerking. Hoogovenslakken zouden toegepast kunnen worden, maar dit is nog niet voorgekomen in Nederland, wellicht vanwege de lage dichtheid en de aantrekkelijkheid van andere toepassingen (cement, funderingsmateriaal).

3.3.2.1 Staalslakken

Van de staalslakkensoorten is vanwege de vrijkomende hoeveelheden LD-slak van belang, genoemd naar het bereidingsprocede Linz-Donawitz.

De gemiddelde dichtheid van de slakken varieert naar herkomst tussen $3,1$ en $3,4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

De maximale wateropneming is ongeveer 2% (m/m).

De sterkte van de slakken bepaald volgens standaardproeven op bereid fijn materiaal is zeer goed te noemen. De sterkte van vooral grovere sorteringen wordt daarmee echter niet goed gekarakteriseerd vanwege voorkomende discontinuïteiten (breukvlakken) en spanningen tengevolge van het koelproces. Valproeven kunnen voor dit materiaal een realistischer sterkte-maat opleveren. Naar schatting is vooral het grovere materiaal duidelijk breukgevoeliger dan de gewoonlijk in Nederland toegepaste breuksteensoorten.

Naar schatting zijn staalslakken slijtvast en behouden daarmee goed hun hoekigheid.

Staalslakken zijn bestand tegen vorst- en dooiwisselingen. Tengevolge van het voorkomen van vrije kalk is de bestandheid tegen water enigszins beperkt (voor eisen en beproeving zie [6]). Voor loskorrelige waterbouwkundige toepassing is beproeving op bestandheid tegen vocht door een kookproef realistisch en efficiënt. Deze proef wordt danook in CEN-verband overgenomen (EN 1367-3). Voor toepassing in gebonden mengsels wordt echter een onlangs in Duitsland ontwikkelde proef aanbevolen, waarmee volumeverandering onder stoombelasting wordt bepaald. Ook deze proef wordt als CEN-proef voorbereid (EN 1744-1).

In relatie tot het constructieve gedrag zijn voornoemde proeven voor vochtbestendigheid optimaal te noemen omdat verfijning bij loskorrelig materiaal gewoonlijk bepalend is voor de gebruikswaarde en zwelling de gebonden toepassing vooral kan bedreigen.

Samenstelling en uitloging van LD-slakken kunnen op basis van beperkte gegevens, aan de eisen voor categorie 1 van het Bouwstoffenbesluit voldoen.

Kritische stoffen zijn chroom, vanadium en nikkel.

Staalslakken worden in het verwerkingsproces ontijzerd en afhankelijk van de produktie-installatie in meerdere sorteringen gescheiden. De grofste sorteringen hebben een nominale bovenmaat van 250 mm. De sortering 40/160 mm is een sortering, die in de Standaard RAW Bepalingen is opgenomen. Deze sortering is de fijnste sortering, die volgens het Bouwstoffenbesluit nog tot "vormgegeven" classificatie van het materiaal leidt.

Staalslakken zijn kubisch en scherphoekig gevormd. De gemiddelde verhouding tussen lengte en dikte van de stukken slak varieert tussen 1,5 en 1,9. Het gehalte platte stukken is niet groter dan ongeveer 10%. Staalslakken kunnen enige binding vertonen vooral tengevolge van de aanwezigheid van vrije kalk en karbonaat. Dit is afhankelijk van de aanwezigheid van een fijne fractie en de grootte daarvan. In 40/160 treedt binding niet op tenzij een fijne fractie gegeneerd wordt door bijvoorbeeld abrasie. Dientengevolge is in een toplaag in een oever wel plaatvormingesignaleerd.

Het onder andere in brokstukken in de stukken slak aanwezige ijzer kan een beperkte levensduur veroorzaken van polypropylenegeotextielen. In verband met de hoge dichtheid zijn staalslakken aantrekkelijk voor toepassing in toplagen.

3.3.2.2 Fosforslakken

Fosforslakken ontstaan bij de ontsluiting van fosfor uit fosfaaterts.

De dichtheid van het materiaal is $2,7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. De Maximale wateropneming is 1% (m/m). Wat sterkte betreft geldt ruwweg hetzelfde over staalslakken is gezegd. De elementaire sterkte van fijn gebroken materiaal is wat geringer dan van staalslakken en daarmee ook waarschijnlijk de slijtvastheid. De slakken zijn bestand tegen vorst- en dooiwisselingen.

Fosforslakken vertonen geen onbestendighedsverschijnselen

Fosforslakken kunnen in de categorie 1 van het Bouwstoffenbesluit vallen. Fluor en sulfaat zijn kritische stoffen.

Fosforslakken kunnen als tout-venant en in diverse sorteringen geleverd worden.

Voor tout-venant gelden ongeveer de volgende D_x -waarden: D_{15} 14 mm, D_{50} 35 mm en D_{85} 85 mm. Incidenteel kunnen grote brokstukken voorkomen. Gesorteerde fosforslakken vinden toepassing als wegfunderingsmateriaal in gebonden mengsels en loskorrelig in de waterbouw. De voor staalslakken genoemde standaardsortering 40/160 mm kan gemaakt worden.

De vorm van de fosforslakken is vergelijkbaar met die van staalslakken.

Fosforslakken zijn in diverse waterbouwkundige constructies verwerkt in top- en filterlagen, kaden, aanvullingen etc.

3.3.3 Silex

Silex komt vrij bij de winning van mergel in Zuid-Limburg en aangrenzend in België voor de produktie van cement.

Silex is een mengsel van vuursteen en tau, een zwakke kalksteen. Het tauegehalte is mede bepalend voor de toepasbaarheid.

De dichtheid van de vuursteen is $2,6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ en die van tau $2,0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. De wateropneming van vuursteen is nihil, die van tau groot, ongeveer 7% (m/m).

Vuursteen is zeer sterk en duurzaam. Tau is zwak en vorst-dooigevoelig.

Milieuhygiënisch is geen informatie bekend. Mogelijk kan cadmium problemen geven, omdat deze stof in van nature hoge gehalten in kalksteen kan voorkomen.

Silex wordt gesorteerd in fracties 5/25, 25/70, 0/90 en 90/300 mm (produktie-aanduidingen).

Vuursteen is onregelmatig van vorm met gladde breukvlakken. Tau slijt gemakkelijk tot afgeronde knollen. Silex is kubisch van vorm (lengte/dikte is ca. 1,9).

Silex is recent onderzocht op toepasbaarheid [16], omdat verwacht werd dat door gewijzigde winningslocatie veel meer materiaal in de fractie 90/250 mm vrij zou komen (ca. 0,6 miljoen t/j). Dit is nog niet het geval. De nu vrijkomende hoeveelheden zijn zonder problemen af te zetten. Gezien de eigenschappen van silex en het veelal hoge gehalte tau is toepassing in filters te ontraden indien het gehalte fijn materiaal daarin aan strenge eisen is gebonden. In toplagen boven water zou voor verlies aan tau door overdosering of bijstorten gecompenseerd kunnen worden. In schanskorven zou verlies aan tau de levensduur te sterk kunnen bekorten.

3.3.4 Puinggranulaten

Puinggranulaten zijn steenmaterialen die uit een bewerkingsproces van bouw- en sloopafval vrijkomen. Er worden drie groepen onderscheiden: betongranulaat, metselwerkgranulaat en menggranulaat, een mengsel van beton- en metselwerkgranulaat.

De dichtheid van korrels betongranulaat is ongeveer 2100-2340 kg/m³ en van metselwerkgranulaat 700-2060 kg/m³. De wateropneming bij atmosferische druk is van betongranulaat ongeveer 4% (m/m) en van metselwerkgranulaat ongeveer 12% (m/m).

Betongranulaat is in verhouding tot natuursteen betrekkelijk zwak. Er komen echter geen discontinuïteiten in voor. Metselwerk is nog zwakker dan betongranulaat. Er kan in puinggranulaten bij verwerking gemakkelijk enige toename van de fijne fractie ontstaan.

Milieuhygiënisch kunnen puinggranulaten in categorie 1 van het Bouwstoffenbesluit vallen.

Puinggranulaten kunnen in sorteringen tot ongeveer 200 mm zeefmaat met een breekzeefinstallatie geproduceerd worden. Boven 200 mm kan grof materiaal geselecteerd worden. Puinggranulaten worden vooral in de wegenbouw als funderingsmateriaal toegepast. Ook toepassing als toeslagmateriaal in beton, waarvoor vooral betongranulaat in aanmerking komt, is mogelijk en wordt verder bestudeerd en gestimuleerd.

Hoogwaardige toepassing in de waterbouw is mogelijk in filterlagen en kernmateriaal in kleine dammen en als onderlagen op een geotextiel (voor verdere literatuur zie [14] [17]).

4. Kwaliteitsborging

Kwaliteitsborging in verband met de toepassing van steenmaterialen in waterbouwkundige constructies omvat diverse fasen en betrokkenheden: ontwerp, productie en levering van de steen, verwerking van de steen in de constructie en onderhoud van de constructie.

Momenteel vindt in Nederland een betrekkelijk snelle ontwikkeling plaats naar de invoering van kwaliteitssystemen in al deze fasen.

Zo is in CROW-verband door de stuurgroep kwaliteitssystematiek-GWW de aanbeveling gedaan om gefaseerd te groeien naar een situatie waarin werken kunnen worden opgedragen aan een "gecertificeerde" aannemer. De fasering is gericht op totale implementatie van een kwaliteitssysteem binnen de aannemingsbedrijven in 1997, een door Rijkswaterstaat aangegeven streefdatum.

Het Bouwstoffenbesluit is gericht op milieutechnische kwaliteitsverklaringen die uiterlijk 1998 tot stand zouden moeten zijn gebracht. Naar verwachting zal dit tevens een stimulans zijn voor certificatie van de civieltechnische eigenschappen van producten.

De Eropesche normontwikkeling voor producten wordt gericht op het in samenhang daarmee ontwikkelen van kwaliteitsverklaringen (CE-merk, "evaluation of conformity").

Deze ontwikkelingen gaan gepaard met veel cursussen en voorlichting.

Hier wordt slechts ingegaan op een deel van kwaliteitssystematiek gericht op steenmaterialen voor de waterbouw, namelijk feitelijke controle op kwaliteitsaspecten van breuksteen.

Als algemene regel kan ten aanzien van kwaliteitscontrole gesteld worden, dat alle relevante variabele en beïnvloedbare eigenschappen begrensd dienen te worden door eisen en daarop gecontroleerd dienen te worden. De mate van variabiliteit is bepalend voor de frequentie van controle.

Hierna wordt in hoofdlijnen op slechts enkele aspecten van kwaliteitscontrole ingegaan. Voor uitgebreidere informatie zie [7] hoofdstuk 3.7 en de bijlage bij deze cursusbijdrage "G.J. Laan, Quality and quality control of stone for hydraulic structures. John Wiley & Sons Ltd. River, coastal and shoreline protection: erosion control using riprap and armourstone "1995".

4.1 De aard van het werk

De mate van kwaliteitscontrole en de wijze waarop dit wordt uitgevoerd hangt samen met de grootte van het werk waarin de steen wordt toegepast en de aard van de groeve waaruit de steen geleverd wordt.

Een routinematige levering uit een bestaande groeve met ervaring met de produktie van desbetreffend materiaal moet via daarop afgestemde regels voor kwaliteitscontrole uitgevoerd kunnen worden. De standaard RAW-bepalingen [6] zijn hierin toereikend.

Wanneer een nieuwe groeve betrokken is, is extra aandacht voor kwaliteit doorgaans vereist vanwege veelal voorkomende aanloopproblemen en onvoldoende vertrouwd zijn van de producent met, en anticiperen op de kwaliteitsbepalende factoren in het produktie- en transport-proces en de kwaliteitscontrole als zodanig. Voornoemde situaties vragen om certificatie.

Grote steenleveringen uit bestaande of nieuw te openen groeven vereisen veel aandacht voor onder andere kwaliteit maar ook afstemming van produceerbare en gevraagde sorteringen en hoeveelheden, transport, laad- en losfaciliteiten, organisatorische verantwoordelijkheden etc. Het openen van een nieuwe groeve vraagt in bijzonder onderzoek voorafgaande aan de produktie, waarbij allerhande technieken een rol kunnen spelen. Het gaat hierbij om verzamelen en interpreteren van alle beschikbare geologische kennis, het onderzoeken van monsters uit boringen en onderzoek in boorgaten [19], bestudering van breukpatronen in de steenformatie, afleiding van de vrijkomende massaverdelingen mede in afhankelijkheid van het springplan, proefspringingen etc.

De bijzondere aandacht voor kwaliteitsaspecten bij grote werken is niet alleen nodig vanwege de met kwaliteit verbonden risico's, maar vooral ook vanwege de grootschaligheid. Deze grootschaligheid kan tot grote belastingen van de steen leiden vanwege de zware apparatuur, grote depots en in bulk behandelen van zware sorteringen. In vroegtijdig overleg tussen de producent en de verantwoordelijke voor de uitvoering van het waterboukundige werk dienen de volgende aspecten afgestemd te worden: produktie- en overslagplan, kwaliteitseisen en controle-eisen in het contract, alle benodigheden voor kwaliteitscontrole, frequentie en plaats van controle, personeel inclusief organisatie en verantwoordelijkheden, uitwisseling van resultaten van kwaliteitscontrole.

In het geval dat breuksteen betrokken wordt uit een groeve waarmee de gebruiker nog geen ervaring heeft, is het aan te bevelen bestaande ervaringskennis in vergelijkbare toepassingen te bestuderen.

4.2 Intrinsieke eigenschappen

Intrinsieke eigenschappen zijn de eigenschappen, die met het steenvoorkomen min of meer gegeven zijn. Het betreft alle eigenschappen behalve sorterings- en vormeisen en verontreinigingen, welke aspecten produktiebepaald zijn. In principe geldt dat intrinsieke eigenschappen een minder frequente controle behoeven, vooral wanneer uit petrografisch en geologisch onderzoek weinig variatie aanwezig blijkt te zijn.

Nu is deze variatie in de praktijk enigszins en soms sterk aanwezig. In een groeve kunnen verschillende steensoorten voorkomen en onbestendigheid zoals zonnebrand komen veelal lokaal in de groeve voor. Ook het produktieproces kan variatie in intrinsieke eigenschappen veroorzaken doordat bijvoorbeeld zwakker materiaal met een lagere dichtheid fijner breekt en daarmee vooral in de fijnere sorteringen terecht kan komen.

Een en ander vereist procescontrole en frequenter produktcontrole dan in het geval van werkelijk onbeïnvloedbare constante eigenschappen.

De omvang van de controle bij afname van een produkt hangt in principe van veel factoren af: de variabiliteit van een eigenschap, de mate van het ontwerp kundig danwel in vergelijk met de bestekseis kritisch liggen van een eigenschap, kosten van keuring etc.

Hierbij kan onderscheid gemaakt worden in vereiste nauwkeurigheid gelet op de betrokkenheid van een leverende en een ontvangende partij, en de ontwerp kundige betekenis (zie verder daarover 4.3).

In het geval van (nog niet bestaande) levering van breuksteen met certificaat, valt afnamecontrole zeker niet geheel weg, omdat een certificaat geen absolute kwaliteitsgarantie biedt. In elk geval is visuele controle bij ontvangst nodig. Incidentele daadwerkelijke meting van de gegarandeerde eigenschappen bij aanvoer dient deel uit te maken van het kwaliteitssysteem en dient zeker bij twijfel aan de kwaliteit uitgevoerd te worden.

4.3 Produktie-bepaalde eigenschappen

Korrel- en massaverdeling, vorm van de steenstukken en de kans op optreden van verontreinigingen zijn bij uitstrek van het produktieproces afhankelijk.

Dit vereist voortdurende controle. Ook wanneer sorteringen mechanisch geproduceerd worden is variabiliteit van het produkt van veel factoren afhankelijk: slijtage van de breek-zeefinstallatie, variatie in de grofheid van het in de installatie ingevoerde steenmateriaal, verfijning en vervuiling door overslag en vermenging met andere produkten.

Gezien de vele factoren die van invloed zijn op de kwaliteit van het eindprodukt is scholing en ervaring van produktiepersoneel, zowel als bij afnamecontrole van belang.

Voor intrinsieke eigenschappen is al verwezen naar het belang van de nauwkeurigheid van kwaliteitsbepaling. Kwaliteitscontrole kan beoordeeld worden als middel om het voldoen aan kwaliteitseisen bij overdracht van een partij materiaal te bepalen of in de ontwerp kundige betekenis. Wat het eerste betreft geldt dat een keuringskarakteristiek voldoende onderscheidend moet zijn om de kansen op onterecht goed- of afkeuren voldoende klein te houden. Deze kansen worden gewoonlijk op maximaal 2,5 tot 5% gesteld. De producent anticipeert daarop met de werkelijke veilige geproduceerde kwaliteit en controle daarop.

Het voldoende klein houden van de onterechte goed- en afkeurreisico's is van belang vanwege de veelal grote financiële gevolgen bij verwerpen van een partij, eventuele gevolgen daarvan voor de werkuitvoering en vanwege de vereiste kwaliteit van het werk. Gewoonlijk worden de risico's die samenhangen met een beperkte nauwkeurigheid in een afnamecontrole gelijkelijk verdeeld over betrokken partijen. Beide partijen dienen dan ook een kwaliteitsmarge aan te houden tussen de eis en de werkelijke te leveren cq. geleverde kwaliteit. Ontwerptechnisch kan dit door bij een deterministisch ontwerp een veiligheidsfactor aan te houden en door van mede uit het voorgaande volgende kansverdelingen uit te gaan bij probabilistisch ontwerpen.

Een en ander is nog slecht ontwikkeld, doordat te sterk uitgegaan wordt van een grote mate van nauwkeurigheid van keuringen. Vooral wat zware sorteringen betreft is een grote nauwkeurigheid slechts bereikbaar met zeer uitgebreide en dure metingen, waarbij de omvang van de monsters en bijkomend de representativiteit en de weegnauwkeurigheid van belang zijn.

Bij een en ander dient ook overwogen te worden dat bij afkeuring door de leverende partij vooral bij een onnauwkeurige controle al snel een herkeuring of uitgebreidere keuring gewenst wordt. Los van oponthoud en kosten is hier geen bezwaar tegen in te brengen. Dit leidt dan echter wel tot ongelijke keuringsrisico's.

Tenslotte zijn hier nog vermeld dat afnamecontrole slechts één van de onzekere factoren in een ontwerp is. Het verwijzen naar hetgeen in hoofdstuk 2 met "structuur in eisen" gezegd is brengt nog allerhande andere onzekerheden in beeld zoals de relatie tussen modelproefresultaten (elementaire gedragseigenschap) en het werkelijke constructieve gedrag zoals in ontwerpmodellen is vastgelegd.

4.4 Verwerkings-afhankelijke eigenschappen

Tijdens de verwerking dient controle uitgeoefend te worden op handelingen, die de steenkwaliteit kunnen beïnvloeden. Dit betreft in elk geval de sorteringen. Ruwe overslag en wijze van aanbrengen in het werk kan tot aanzienlijke verfijning leiden, afhankelijk van de kwetsbaarheid van het materiaal. In praktisch voorgekomen gevallen werd echter ook bij zeer ruwe lossing van een sterke basalt met weinig discontinuïteiten ontoelaatbaar veel verfijning vastgesteld. Werkuitvoering en eventuele besteksbepalingen die hierop gericht zijn en adequate controle verkleinen deze risico's.

Tenslotte wordt erop gewezen dat laagdikte, vlakheid van de laag en dichtheid van een laag bij plaatsing van steen daarop gerichte eisen en controlewijzen behoeven. Ervaring met daartoe ontwikkelde of te ontwikkelen controlewijzen en interpreteerbaarheid van meetresultaten naar de constructieve betekenis daarvan is van belang.

Literatuur

1. NEN 529. Zetsteen, bloksteen en zink- en stortsteen van natuursteen. NNI, 3e druk, oktober 1970.
2. NEN 532. Basalt. NNI, 4e druk, oktober 1974.
3. TL Min-StB83. Forschungsgesellschaft für Strassen und Verkehrswesen. Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Strassenbau, August 1983.
4. NBN B11-101. Steenslag en grind: korreلمaten. Belgische Instituut voor Normalisatie, januari 1975.
5. CUR-aanbevelingen (v.a. 1989). Gebroken harde kalksteen (aanbeveling 13), gebroken kwartsiet (aanbeveling 17), gebroken graniet (aanbeveling 22), gebroken porfier (aanbeveling 23) en gebroken harde zandsteen (aanbeveling 30) als (grof) toeslagmateriaal voor beton.
6. CROW. Standaard RAW-bepalingen 1990.
7. CUR. Manual on the use of rock in hydraulic engineering. CUR report 169. Gouda 1995.
8. NEN 70214 Gloomngselementen van beton. NNI, 1e druk, oktober 1972.
9. NEN 5950 "Voorschriften Beton Technologie-Eisen, vervaardiging en keuring". NNI 1986.
10. NEN 5905. Toeslagmaterialen voor beton, zand en grind. NNI, 1e druk, november 1988.
11. CROW. (verwacht) Betonblokkenmatten en kunststoffilterdoek. Betonelementen. Standaard RAW-bepalingen 1995, hoofdstuk 52, par. 21 t/m 27 en par. 41 t/m 47, 1995.
12. KIWA Nationale Beoordelingsrichtlijn voor het KOMO-produktcertificaat voor gewassen mijsteen voor de civiele techniek BRL 9301, 1995-05-01.
13. Laan G.J. De toepasbaarheid van mijnsteen in de waterbouw. Rapport WKE-R-78156 4e versie, DWW, Delft 1978.
14. CUR. Toepassing van alternatieve materialen in de waterbouw-literatuurstudie, Rapport 89-1.
15. Laan G.J. Kwaliteit en kwaliteitscontrole van slakken voor de waterbouw. Rapport WKE-R-83019. DWW, Delft, 1986.
16. PBI. Toepassingsmogelijkheden van silex in de waterbouw. Rapport R 90.040 PBI (nu Intron) Maastricht, 1993.
17. CUR. Hergebruik van beton- en metselwerkgranulaat in het kader van een optimale bouwcyclus. Materiaalreferentiedocument. CUR-rapport 94-9A.
18. CUR. Manual on the use of rock in coastal and shoreline engeneering. CUR/CIRIA. CUR report 154, Gouda 1991.
19. LCPC. Les Enrochements. LCPC, 1989.